

IDENTIFICACIÓN DE LA ECUACIÓN DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO
DE CONO QUE SE AJUSTE A LAS PROPIEDADES CARACTERÍSTICAS
DE LOS MATERIALES UTILIZADOS COMO SUBBASE PARA
PAVIMENTOS FLEXIBLES EN BARRANQUILLA

JAVIER EDUARDO ESCORCIA MONTERO
LUIS FERNANDO RODRÍGUEZ ARZUAGA
SILVIO ANTONIO PUPO MEZA
MARGARETH INDIRA VIECCO MÁRQUEZ

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA DE LA COSTA, C.U.C.
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BARRANQUILLA
2004

IDENTIFICACIÓN DE LA ECUACIÓN DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO
DE CONO QUE SE AJUSTE A LAS PROPIEDADES CARACTERÍSTICAS
DE LOS MATERIALES UTILIZADOS COMO SUBBASE PARA
PAVIMENTOS FLEXIBLES EN BARRANQUILLA

JAVIER EDUARDO ESCORCIA MONTERO
LUIS FERNANDO RODRÍGUEZ ARZUAGA
SILVIO ANTONIO PUPO MEZA
MARGARETH INDIRA VIECCO MÁRQUEZ

Trabajo presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil.

Ing. LORENA CABAS
Ing. MIGUEL GARCÍA
Asesores Técnicos

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA DE LA COSTA, C.U.C.
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BARRANQUILLA
2004

Barranquilla, 27 de Febrero del 2004

Señor

DIRECTOR PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

Ciudad

Por medio de la presente estamos sometiendo a su consideración la solicitud para la aprobación del trabajo de grado titulado: **IDENTIFICACIÓN DE LA ECUACIÓN DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO QUE SE AJUSTE A LAS PROPIEDADES CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS COMO SUBBASE PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES EN BARRANQUILLA** Como requisito parcial para optar el título de INGENIERO CIVIL en la Facultad de Ingenierías de la Corporación Universitaria de la Costa, CUC.

Adjuntamos con la presente la documentación requerida, debidamente diligenciada para su estudio.

Cordialmente.

Javier E. Escorcia Montero
CC No. 19.600.598 Fundación

Luis F. Rodríguez Arzuaga
C.C. No. 12.635.827 Cienaga

Silvio Antonio Pupo Meza
CC No. 11.105.497 P/Nvo

Margareth I. Viecco Márquez
C.C. No. 44.190.865 S/larga

=====
ESPACIO RESERVADO PARA LA FACULTAD

Fecha de entrega de la solicitud para aprobación: _____

¿Solicitud aprobada? SI ☐ NO ☐ Fecha

Observaciones: _____

Ing. NAYIB MORENO RODRIGUEZ
Director Programa de Ingeniería Civil

Barranquilla, 27 de Febrero del 2004

Señor:

DIRECTOR PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

Ciudad

Certificamos que el PROYECTO: IDENTIFICACIÓN DE LA ECUACIÓN DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO QUE SE AJUSTE A LAS PROPIEDADES CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS COMO SUBBASE PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES EN BARRANQUILLA, ha sido evaluado, lográndose los alcances establecidos en la propuesta.

Cordialmente,

ASESORES TECNICOS

Ing. MIGUEL GARCÍA SIERRA

Ing. LORENA CABAS VASQUEZ

ASESOR METODOLOGICO

Ing. DIANA DE LA OSSA

Le doy las gracias a Dios por acompañarme en mis duros momentos, por enviarme su espíritu Santo para que me iluminara en mis parciales, a mi mamá por brindarme todo su apoyo, dedicación y comprensión, a mi papá le agradezco por esmerarse en buscar lo que yo necesitaba, a mi hermano Milton por su apoyo moral, a Zoila Pabón le dedico este proyecto por darme su amor y cariño, también lo dedico a mis amigos por brindarme su apoyo en los tiempos mas difíciles de mi carrera y a todas esas personas que confiaron y creyeron en mi durante todo el tiempo que estuvieron a mi lado.

Javier Eduardo Escorcia Montero

Dedico este triunfo a mis padres quienes fueron mi apoyo incondicional, por la confianza que depositaron en mi y por creer que yo podría alcanzar esta meta que hoy se convierte en una parte fundamental de mi vida, a mis hermanos por el amor, respeto y tolerancia, y a todas las personas que creyeron en mi.

Luis Fernando Rodríguez Arzuaga

Gracias a Dios por darme la fortaleza de conseguir este triunfo, por brindarme esperanza y fe en los momentos difíciles.

A mis padres Silvio Adelmo Pupo Uparela, y a mi madre Deyanira Isabel Meza Álvarez quienes por su amor y comprensión me brindaron la confianza necesaria para realizar este sueño que se me hace realidad.

A mis hermanas Mayra Luz Pupo Meza, y Mariny Lucía Pupo Meza quienes son fuentes de mi inspiración y parte de mi corazón.

A mi sobrina María Lucía Sánchez Pupo quien es la mujer de mi vida, a mi tía Luzmila Pupo su comprensión, a la vez a todas las personas que de una u otra manera me brindaron su energía y quienes creyeron en mí

Silvio Antonio Pupo Meza

*Gracias Padre Celestial por todo, por tu sabiduría y tu
inmenso amor.*

*A Rita Luz Márquez Vizcaino, por su ejemplo, su invaluable apoyo,
comprensión y por todo aquello que nunca podré pagarle.*

A Rita Vizcaino quien me ha dado cariño, regocijo y empeño.

*A mi madre, Josefa M^{te} Márquez Vizcaino por su cariño,
confianza y apoyo.*

*A mis hermanas Rita, mis hermanitos, mis tías, mi tío y mis
primos que han sabido entusiasmarme y acompañarme en los
caminos de la vida.*

*A Silvio Antonio por brindarme su amor, cariño, apoyo y
comprensión, gracias por llegar a mi vida en el momento justo.*

*Reciban todas estas sencillas palabras con el más sincero
sentimiento, que me permite homenajearlos...*

Margareth Indira Viecco Márquez

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

- La Corporación Universitaria de la Costa
- Los asesores técnicos Miguel García y Lorena Cabas
- La asesora metodológica Diana De la Ossa
- El Laboratorista Jorge Brochero y a María Cecilia Nández
- Los propietarios de las canteras MUNARRIZ y OCHOA

Y a nuestros queridos compañeros que nos ayudaron a realizar este proyecto, principalmente a Leonardo Guerrero, Jair Vásquez Santodomingo, Eduardo Fuentes, Julián Orozco, Rosmery Barrera, Norys Ortiz, Yucelis Rada y Shirly Contreras.

CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN	26
1. GENERALIDADES DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO (PDC)	29
1.1 ANTECEDENTES	29
1.2 DESCRIPCION GENERAL	35
1.3 PARTES DEL PENETRÓMETRO.	37
1.3.1 Aparatos y material necesario.	38
1.3.2 Dispositivos de golpeo.	38
1.3.3 Instrumentos de medida Contador de golpes.	39
1.4 PRINCIPIO FÍSICO.	39
1.5 DINAMICA DEL PDC	41
1.6 CORRELACION ENTRE EL PDC Y EL CBR	48
2. USOS Y VENTAJAS DEL EQUIPO	49
2.1 TERRAPLENES	49
2.2 CAPAS DE FUNDACIÓN	50
2.3 EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS	50
2.4 LIMITACIONES	51
3. CANTERAS EN ESTUDIO	53
3.1 CANTERA MUNARRIZ	54
3.2 CANTERA OCHOA	55
4. CARACTERISTICAS GEOLÓGICAS	56
4.1 GEOLOGÍA	56
4.2 GEOLOGIA DE LA CIUDAD DE BARRANQUILLA.	62
4.2.1 Calizas arenosas, margosas y margas, rocas coralinas.	62
4.2.2 Arcillas.	63
4.2.3 Depósito de arenas limosas de origen marino o aluvial.	64

4.2.4 Depósitos de limos y arenas muy finas eólica.	64
4.2.5 Afloramientos de areniscas friables cementadas en matriz Arcillosa.	64
5. PAVIMENTOS	65
5.1 CARACTERÍSTICAS DEL PAVIMENTO	65
5.2 TIPOS DE PAVIMENTOS	65
5.2.1 Pavimento Flexible.	66
5.2.2 Funciones de las Capas de un Pavimento Flexible.	66
5.3 MATERIALES PARA BASES Y SUBBASES DE PAVIMENTOS	67
5.4 PAVIMENTOS FLEXIBLES	67
6. DEFINICIÓN DE ENSAYOS A UTILIZAR	69
6.1 CLASIFICACIÓN DE SUELOS	69
6.1.1 Clasificación de suelos A.A.S.H.T.O.	69
6.1.2 Clasificación unificada de suelos.	75
6.2 LÍMITES DE ATTEMBERG	80
6.2.1 Limite líquido.	80
6.2.2 Limite plástico.	82
6.3 HUMEDAD NATURAL	83
6.3.1 Procedimiento	83
6.4 PRÓCTOR MODIFICADO	84
6.4.1 Equipos	84
6.4.2 Procedimientos	85
6.5 ENSAYO DE CONO DE ARENA	86
6.5.1 Procedimiento.	87
6.6 ENSAYO CBR EN LABORATORIO	87
6.6.1 Procedimiento	88
6.7 PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO (CBR in situ)	90
7. CÁLCULOS	93
7.1 DATOS Y CÁLCULOS DEL CBR OBTENIDO EN EL LABORATORIO.	93

7.2 DATOS Y CÁLCULOS DEL CBR MEDIANTE LA SIMULACIÓN DE COMPACTACIÓN EN CAMPO PARA LA UTILIZACIÓN DEL PDC.	94
7.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS E IDENTIFICACIÓN DE LA ECUACIÓN QUE MEJOR SE AJUSTE A LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS.	95
8. CONCLUSIONES	98
BIBLIOGRAFÍA	100
ANEXOS	102

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Cronología Geológica de la Ciudad de Barranquilla	61
Tabla 2. Clasificación de los suelos por el método AASHTO (1)	74
Tabla 3. Clasificación de los suelos por el método AASHTO (2)	74
Tabla 4. Clasificación Unificada de suelos	79
Tabla 5. Resultados del CBR, práctica en el laboratorio	94
Tabla 6. Resultados del CBR, práctica in situ	95
Tabla 7. Comparación CBR in situ – CBR en laboratorio	96

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Dimensiones del Cono	34
Figura 2. Partes del Penetrómetro Dinámico de Cono	37
Figura 3. Curva Esfuerzo Deformación	42
Figura 4. Geomorfología de la Ciudad de Barranquilla	60
Figura 5. Granulometría	70
Figura 6. Práctica del Próctor	84
Figura 7. Práctica del Cono de Arena	86
Figura 8. Práctica del CBR	90
Figura 9. Práctica del PDC	92

LISTA DE ANEXOS

	Pág
Anexo A. Ensayos de CBR en laboratorio del material MUNARRIZ	103
Anexo B. Ensayos de CBR en laboratorio del material OCHOA	127
Anexo C. Ensayos del CBR en campo Cantera MUNARRIZ	151
Anexo D. Ensayos del CBR en campo Cantera OCHOA	152
Anexo E. Clasificación del material MUNARRIZ	153
Anexo F. Clasificación del material OCHOA	154
Anexo G. Próctor del material MUNARRIZ	155
Anexo H. Próctor del material OCHOA	157
Anexo I. Anteproyecto	159

RESUMEN

Este proyecto de grado tiene como objetivo identificar la ecuación de Penetrómetro Dinámico de Cono que mejor se ajuste a las propiedades de los materiales utilizados como subbase en pavimentos flexibles, tomando como referencia los disponibles en las canteras Munárriz y Ochoa. Para la ejecución del proyecto se tuvo en cuenta el estudio de las propiedades y características de los materiales, como también su resistencia la cual se obtuvo mediante el ensayo de CBR, este ensayo también se realizó en campo con la ayuda del PDC. Estos dos resultados son analizados para determinar cual es la ecuación que se ajuste a la realidad de estos suelos.

Este trabajo se ejecutó mediante procesos investigativos, tendiendo en cuenta aspectos tanto en la parte científica como en la experimental. El estudio se basa en la realización de doce ensayos para determinar la resistencia de los suelos de las canteras de la ciudad de Barranquilla (MUNÁRRIZ y OCHOA) tanto en laboratorio como en campo con la aplicación de procedimientos normalizados, una posterior comparación de los resultados obtenidos y finalmente la identificación del modelo matemático que se ajuste a cada material.

Palabras Claves: Penetrómetro Dinámico de Cono, Pavimentos flexibles, Munárriz y Ochoa, CBR, PDC, Barranquilla.

ABSTRACT

This project aims to identify the equation of Dynamic Cone Penetrometer that best fits the properties of the materials used as subbase in flexible pavements, taking as reference those available in the Munárriz and Ochoa quarries. For the execution of the project the study of the properties and characteristics of the materials was taken into account, as well as its resistance which was obtained by the CBR test, this test was also carried out in the field with the help of the PDC. These two results are analyzed to determine which equation fits the reality of these soils.

This work was carried out through investigative processes, taking into account aspects in both the scientific and the experimental part. The study is based on the realization of twelve tests to determine the resistance of the quarry soils of the city of Barranquilla (MUNÁRRIZ and OCHOA) both in the laboratory and in the field with the application of standardized procedures, a later comparison of the obtained results and finally the identification of the mathematical model that fits each material.

Keywords: Dynamic Cone Penetrometer, flexible pavements, Munárriz and Ochoa, CBR, PDC, Barranquilla.

INTRODUCCIÓN

La determinación de los parámetros de diseño en un pavimento flexible ha sido en los últimos años una aplicación basada en métodos empíricos y semiempíricos, los cuales, en la práctica profesional evolucionan de forma lenta pero progresiva, ya que se han implementado nuevas técnicas de investigación, análisis y estudios.

Uno de los métodos para determinar un parámetro fundamental de resistencia “CBR” para el diseño es mediante la utilización del Penetrómetro Dinámico de Cono “PDC”, el cual es aplicable en situ, brindando rapidez y economía.

Para obtener información respecto a las ecuaciones del PDC existentes en Colombia que mejor se ajusten a las propiedades de los materiales usados para subbase (cantera Munárriz y Ochoa) es necesario ejecutar una secuencia de estudios e investigaciones complementadas con una información experimental en el laboratorio.

Este proceso consta de las siguientes partes:

Los antecedentes del PDC que permiten conocer su desarrollo desde el momento de su aplicabilidad, para la obtención del parámetro de resistencia (CBR). A la vez dar a conocer una información sobre las características y las propiedades correspondientes al PDC.

La dinámica y principio físico, con el cual se pretende mostrar mediante la deducción de un modelo matemático, la energía necesaria para la penetración de la punta cónica en el suelo, definida por la letra “R”, y el número de golpes que van a describir la resistencia propia de los materiales

de las canteras en estudio. Los usos, ventajas y limitaciones del PDC, en este se mostrará la aplicabilidad y los beneficios que se logran al utilizar el instrumento, por otra parte, se mencionarán las restricciones al momento de utilizar el equipo.

En el capítulo de canteras se pretende dar a conocer las propiedades características de los materiales en estudio los cuales serán provenientes de las canteras Munárriz y Ochoa.

Las características geológicas en la cual se expondrá la formación geológica y sus orígenes correspondientes al suelo de Barranquilla y de la zona de donde provienen los materiales.

En el aparte de pavimentos, se definirán conceptos que ayuden a un mejor entendimiento sobre pavimentos flexibles como su estructuración, y las propiedades que deben presentar los materiales sobre los cuales se apoyará el pavimento.

En la definición de los ensayos a utilizar se contemplarán todos los estudios de laboratorios necesarios (granulometría, límites de Atterberg, humedad natural, próctor modificado, cono de arena, CBR, PDC), que permitirán conocer las propiedades de los materiales, cumpliendo con las especificaciones dadas por las normas.

En los cálculos se presentarán los resultados obtenidos de los ensayos consignados en los respectivos formatos para una mejor interpretación. El propósito será lograr una comparación entre el CBR en laboratorio y el CBR en situ, mediante un promedio, determinando de esta forma la ecuación que mejor se ajusta a las propiedades de los materiales mencionados anteriormente.

1. GENERALIDADES DEL PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO (PDC)

El Conjunto de Penetrómetro Dinámico de Cono está diseñado para realizar ensayos de penetración para la evaluación de la consistencia y densidad del suelo.

Los penetrómetros dinámicos más antiguos estaban constituidos por un trípode provisto de una polea en su parte superior y de una masa soltada en caída libre sobre unos tubos metálicos. Su tamaño era considerable, comparado al que se utiliza actualmente. Los penetrómetros dinámicos pesados más actualizados por lo general usan motor.

Para que los resultados arrojados por el PDC portátil sean comparables es necesario unificar los criterios en torno a un solo aparato. Es decir, el área de la punta, el peso del martillo, la altura de caída, la profundidad de penetración.

1.1 ANTECEDENTES

Probablemente, para muchos profesionales del área técnica resulta un tanto desconocido este sencillo equipo, y lo más probable es que, si lo han visto no relacionan sus aplicaciones. Uno de los métodos utilizados para el estudio de diseños de pavimentos es el PDC, originalmente desarrollado en 1959.

La determinación de la capacidad de soporte del suelo se realiza a partir del ensayo CBR, también puede evaluarse a través de las medidas in situ por el deflectómetro de impacto FWD, el cual mide deflexiones que se producen a distintas profundidades en los pavimentos debido a una carga estática,

medidas que son correlacionadas con el módulo resiliente del suelo. Su alto costo limita su uso masivo para caminos de bajo volumen de tránsito.

También existen otras formas de evaluación in situ como ya se ha mencionado tales como: el PDC, el Martillo Clegg y el Geogauge, los que correlacionan las medidas realizadas con valores estructurales.

El PDC es una herramienta sencilla y económica, que consiste en una varilla de acero con una punta cónica hecha de acero endurecido la cual se introduce en las capas del pavimento mediante golpes de un martillo de masa conocida el que se deja caer libremente desde una altura conocida. La penetración medida es una función de la resistencia al corte in situ de los materiales y el perfil de resistencias en profundidad da una indicación de las propiedades de los materiales de las diferentes capas de la estructura hasta la profundidad de auscultación determinada, por lo general se penetra hasta 0.80 m. dado que la acción solicitante del tránsito y el clima afectan a la estructura del pavimento hasta esta profundidad, si se desea penetrar hasta mayores profundidades(0,20 m) se usa una barra de extensión.

Con la penetración medida en lb/mm se obtiene el Índice de penetración de cono «D» y este valor se relaciona con el valor de CBR. En el país se ha encontrado una buena relación entre «D y el CBR» para suelos con capacidades de soporte menores a un 30%. La razón de penetración de PDC puede ser utilizada tanto para identificar las capas inferiores de un pavimento como para estimar el valor del CBR o el valor del Módulo Resiliente¹ (Mr) de estas capas.

¹ MONTEJO FOSECA, Alfonso. Ingeniería de Pavimentos para Carreteras. Pág. 185.

El Módulo Resiliente se obtiene de un ensayo que se efectúa con un equipo triaxial el cual se encuentra en muy pocos laboratorios del país, de ahí la importancia del PDC.

Existen diferentes equipos de Penetrómetro Dinámico de Cono desarrollados en el mundo, principalmente belgas, alemanes y sudafricanos que se diferencian en la energía suministrada para la hinca del instrumento como en el diseño del cono de penetración.

Los primeros intentos de utilizar el PDC para determinar los valores del CBR “*in situ*”, fueron realizados en 1956 por Scala de Australia. Gracias a su facilidad de manejabilidad y su bajo costo de operación, muchos otros intentos de correlacionar los dos ensayos se han hecho en el mundo.

En 1969 Van Vouren en Zimbabwe modificó el Penetrómetro de Scala y todas las correlaciones recientes se han derivado del equipo modificado por Van Vouren.

Posteriormente, ha sido extensivamente estudiado por Kleyn y otros en Sudáfrica (desde 1975), por Harison (1986) en Indonesia y por Liben (1987) en Israel.

En la región de Transvaal, Sudáfrica, ha sido exitosamente empleado para mediciones rápidas de la resistencia “*in situ*” de capas de pavimentos y subrasantes por el departamento de esa provincia desde 1973.

Posteriormente estudios del PDC para lograr correlaciones e introducir en los métodos de diseño y control de pavimentos se han conducido en:

✚ Israel en 1984

- ✦ Reino Unido en el Transport and Road Research Laboratory (TRRL)
- ✦ Bélgica por Kindemans en el Centro de Rechirches Rautiers, en 1976.
- ✦ Argentinos por Silva Angelone, H. del Prato, Jorge Tosticarelli y Fernando Martínez del Instituto de Mecánica aplicada y Estructuras (I.M.A.E.).
- ✦ En Estados Unidos en la Universidad de Illinois en 1991 el Sr. Marshall Thompson condujo 800 ensayos para:
 - a) Evaluar la variabilidad de la subrasante y la capa base.
 - b) Uso del PDC en el control de la construcción
 - c) Aplicación de valores PDC en métodos de diseño de pavimentos.

En 1992 la Universidad de Illinois incluso desarrolló un mecanismo para automatizar el PDC con buenos resultados técnicos pero encareciendo las pruebas.

En la actualidad se dispone de sofisticados programas que facilitan los análisis de los ensayos con el PDC y permiten estimar los valores del CBR in situ.

En sus inicios los penetrómetros eran de gran tamaño con una masa y altura de caída libre considerables, además del diámetro del tubo.

Los equipos necesarios para transportar y operar los penetrómetros iniciales eran de difícil manejo para poder suministrar la energía necesaria y así realizar la prueba. Con este inconveniente únicamente era posible investigar una zona muy reducida con un número muy limitado de perforaciones, y el consiguiente aumento en el tiempo y en el costo de la exploración.

Por otra parte, al hacer pocas perforaciones y tan distintas unas de otras los resultados esperados no eran basados en datos de campo lo suficientemente confiables, debido a la necesidad de extrapolar con pocos puntos.

Además del tamaño, y lo poco funcional, los primeros penetrómetros fueron fabricados con punta de forma no cónica, en ellos se presentaba como un gran problema el hecho de que existe una gran fuerza de rozamiento lateral al hacer contacto con el suelo.

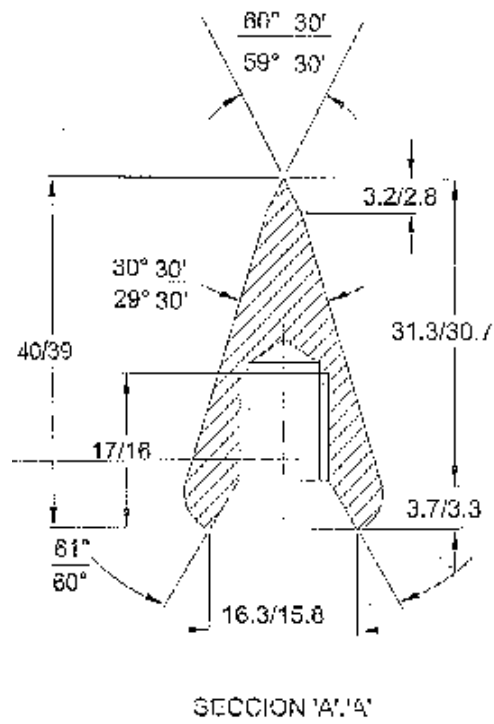
Por lo anterior se vieron en la necesidad de utilizar formas cónicas, en las cuales el esfuerzo inicial que el penetrómetro somete al suelo es mucho mayor por estar concentrado en la punta con un área de contacto mínima. Es decir, la punta cónica facilita la penetración en el suelo al optimizar el esfuerzo en cada punto de contacto a medida que se va profundizando.

Debido a que lo que penetra el suelo es una punta cónica de área muy discreta, el penetrómetro dinámico de cono (PDC) es un método prácticamente no destructivo, capaz de medir la resistencia al corte de la subrasante y de las capas de subbase y base de cualquier pavimento, y esto se traduce en la posibilidad de verificar la confiabilidad de un diseño en el campo, sin entorpecer el nivel de servicio en la vía.

El primer penetrómetro dinámico de cono fue desarrollado en una punta con una inclinación de 30 grados.

Cuando el instrumento se utilizaba en materiales granulares como triturados o Macadan Hidráulico se encontraba que la punta se maltrataba con mucha facilidad y el cono debía reemplazarse. Fue entonces cuando se decidió utilizar el cono con ángulo un poco mayor, de 60° grados (figura 1).

Figura 1. Dimensiones del cono.



Después de muchos meses de uso intensivo se demostró que éste cono tenía una vida útil mucho mas larga al del inicial.

Este cono tiene la ventaja adicional de ser corto (21 mm contra 37mm) lo cual permite analizar el material a través de una distancia pequeña reaccionando rápidamente a los cambios en las condiciones de éste.

El resultado de esto es que los puntos de quiebre en las curvas del PDC sean mas definidos. Esta característica evita que la punta corta esté al mismo tiempo en contacto con dos estratos de características distintas.

Como resultado de pruebas paralelas llevadas a cabo se ha establecido que hay una diferencia del 20% entre las lecturas obtenidas con el cono de 30 grados y el cono de 60 grados. Arroja las últimas lecturas un 20% menor para materiales de la misma resistencia.

Por ser un ensayo en el campo el PDC mide la resistencia al corte de cada capa de un pavimento golpe a golpe, y los resultados son fieles representaciones de la capacidad de carga propias de la estructura. El CBR necesita simular condiciones reales mediante el uso de sobre pesas para tener en cuenta el peso de la estructura, en una escala tan pequeña es muy difícil obtener resultados que se acerquen a la realidad.

El PDC tiene un alcance de penetración de 80 cm lo que permite en un mismo ensayo evaluar tres capas de un mismo pavimento. Los resultados arrojan un perfil de resistencias muy útil para entender como se comportará la estructura ante las cargas de servicio.

La compactación es función de la densidad seca de cualquier capa de pavimento. El CBR depende de la densidad y de la humedad del suelo, por lo que al correlacionar el PDC con el CBR se está en la capacidad de hacer un control rápido, económico y confiable de la compactación durante la construcción.

1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL

El Penetrómetro Dinámico de Cono, consiste de una barra de acero inoxidable con un cono de acero sujetado a un extremo el cual es llevado al interior del pavimento o sub-rasante/sub-base; mediante un martillo deslizante de masa individual con peso de 8 kilos. El ángulo del cono es de 60 grados y el diámetro de su base es 20 mm. El cono ha sido endurecido para incrementar su vida útil. El diámetro del cono es 4mm mayor al de la barra para asegurar que la resistencia a la penetración sea ejercida en el cono. El PDC es introducido en el suelo haciendo caer el martillo deslizante de 8 Kg. desde una altura de 575 mm. Este procedimiento puede ser logrado fácilmente durante un ensayo puesto que el mango exterior de acero está diseñado para deslizarse sobre la barra del PDC.

La profundidad de penetración del cono es medida en la penetración seleccionada o en los intervalos de caída del martillo y la resistencia al corte del suelo (soil shear strength) es reportada en términos del índice del PCD.

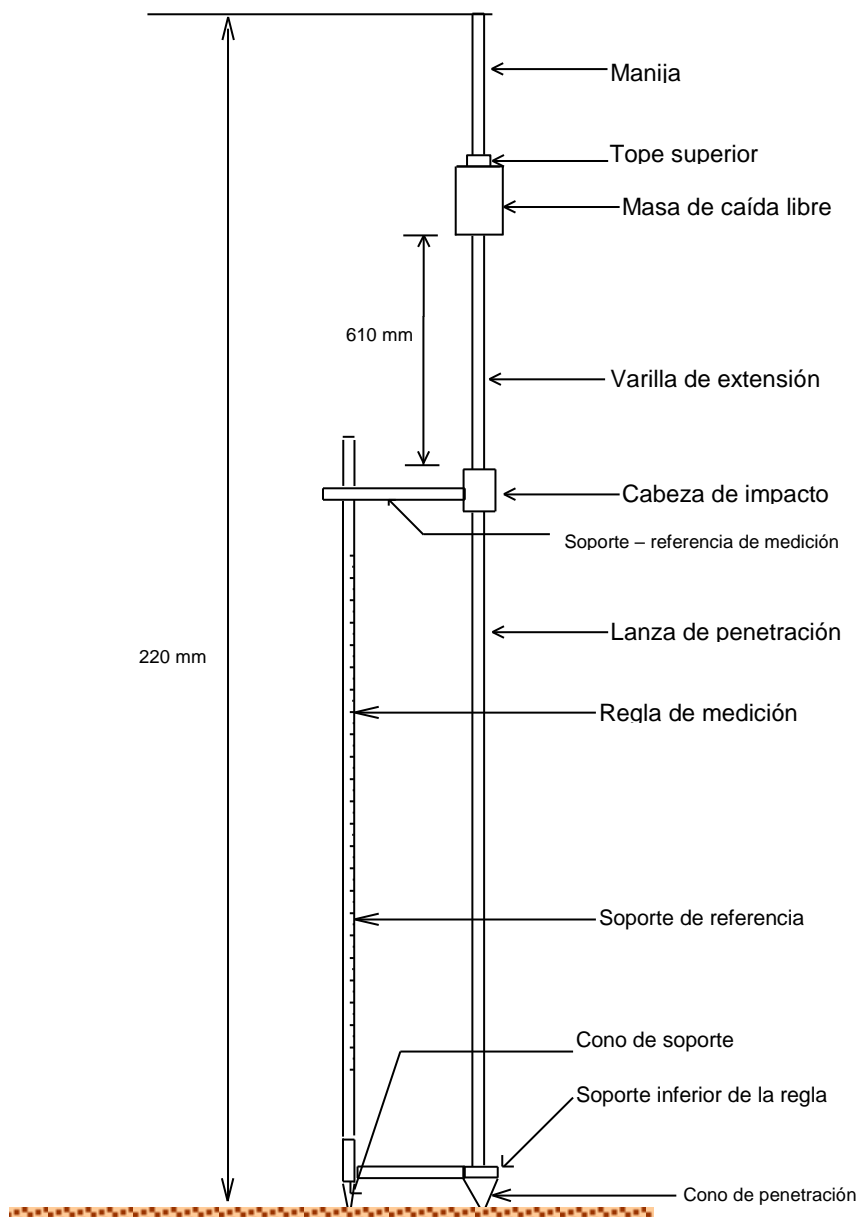
El índice del PDC está basado en la profundidad de penetración promedio resultante de un golpe del martillo de 8 Kg. El PDC está diseñado para penetrar suelos hasta una profundidad de 1.0 m. Los valores individuales del índice del PCD se reportan para cada ensayo de profundidad resultando un perfil suelo-resistencia con profundidad para cada locación de ensayo.

El PDC mide la resistencia al corte del suelo cuyo CBR se encuentre entre 10% - 100%. Este equipo es ideal para el ingeniero que necesita valores de CBR en el campo.

1.3 PARTES DEL PENETRÓMETRO.

El equipo PDC está conformado por diferentes elementos. Estos tienen unas especificaciones las cuales permiten el correcto funcionamiento del aparato (figura 2).

Figura 2. Partes del Penetrómetro Dinámico de Cono



1.3.1 Aparatos y material necesario.

Cono de penetración: Es una pieza de acero en forma cónica con un ángulo de 90° el cono o puntaza podrá ser perdido o recuperable según modelo.

Varillaje: Se denomina así a todo el conjunto de varillas de acero macizas que se utilizan para transmitir la energía de golpeo.

1.3.2 Dispositivos de golpeo.

Masa de caída: Cuerpo pesado de acero que se eleva para conseguir el golpeo.

Cabeza de impacto: Cuerpo de acero que recibe el impacto de la maza y esta unido solidariamente al varillaje.

Guiadera: Como su nombre indica es un elemento guía de la masa en su caída.

Sistema de elevación y escape: es el mecanismo por el cual se eleva la maza y también se suelta.

Martillo de golpeo: Dispositivo de golpeo automático donde la masa, la cabeza de impacto, la guiadera y el sistema de elevación y escape están integrados en un mismo elemento. Permite izar la masa y liberarla siempre a la misma altura sin producir movimientos sobre el varillaje de forma que la caída por la guiadera sea totalmente libre y la energía transferida a la cabeza de impacto sea siempre la misma en todos los golpes. Es el sistema que hace que exista una frecuencia de golpeo uniforme.

Guía soporte: Pieza que asegura la verticalidad y el soporte lateral en el tramo de varillaje que sobresale del suelo.

1.3.3 Instrumentos de medida Contador de golpes. El dispositivo de golpeo utilizado deberá disponer de un contador de golpes automático.

Escala de profundidad: Todo equipo deberá tener una referencia de profundidad de avances marcada de forma indeleble.

Referencia de verticalidad: Permitirá observar en grados o en tanto por ciento la inclinación de la verticalidad del varillaje mediante un inclinómetro.

Medidor del par: Permitirá la medida de N.m del par necesario para girar el varillaje. La exactitud de su medida será comprobada periódicamente.

1.4 PRINCIPIO FÍSICO.

Los penetrómetros se basan en el principio físico de la conservación de la cantidad de movimiento. Se supone además que el choque de la masa con la cabeza de impacto es completamente plástico, es decir no se produce el rebote de la masa al impactar. La cantidad de movimiento de la masa es:

$$(M/g) v = (M/g) \sqrt{2 g H}$$

Siendo $\sqrt{2gH}$ la velocidad en caída libre de un cuerpo, en este caso la masa.

Aplicando posteriormente otro de los principios de mecánica "La diferencia de energía cinética es igual al trabajo efectuado". En este caso la masa pasa de poseer una energía potencial en el momento inicial a tener energía cinética en el momento final, transmitiéndose finalmente al cono que

penetrará en el suelo recibiendo de este una resistencia a la penetración derivada de este concepto.

La resistencia a la penetración del terreno será por tanto:

$$R_d = (M^2 \cdot H) / (M + P) \cdot A \cdot e$$

Siendo:

M: el peso de la maza en kilogramos.

P: es el peso del varillaje en kilogramos.

e : espacio recorrido por la puntaza entre el número de golpes dados

H: altura a la que cae la masa y golpea a la cabeza de impacto

A: área de la puntaza en cm^2

A partir de la fórmula del penetrómetro dinámico de cono empleada por los holandeses se obtiene la siguiente ecuación: (en Newtons = $\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$)

$$Q = (M \cdot H \cdot M \cdot g) / (M + U) \cdot e$$

La resistencia dinámica en la punta será entonces $q = Q/A$ en Pa. Siendo A el área de la punta.

Actualmente se emplea para el penetrómetro Borro y los Dinámicos las siguientes fórmulas para calcular la carga resistente.

$$q_a = (W \cdot g \cdot H) / (A \cdot e)$$

$$q_d = (g \cdot H \cdot M^2) / (M + U) \cdot (A \cdot e)$$

Siendo:

q_a y q_d : valores de resistencia en Pa (N/m^2). (q_a = resistencia específica)

M = es la masa de la maza

U = es la masa del varillaje

H = altura de caída de la masa e = penetración media por golpe

A = área de la puntaza

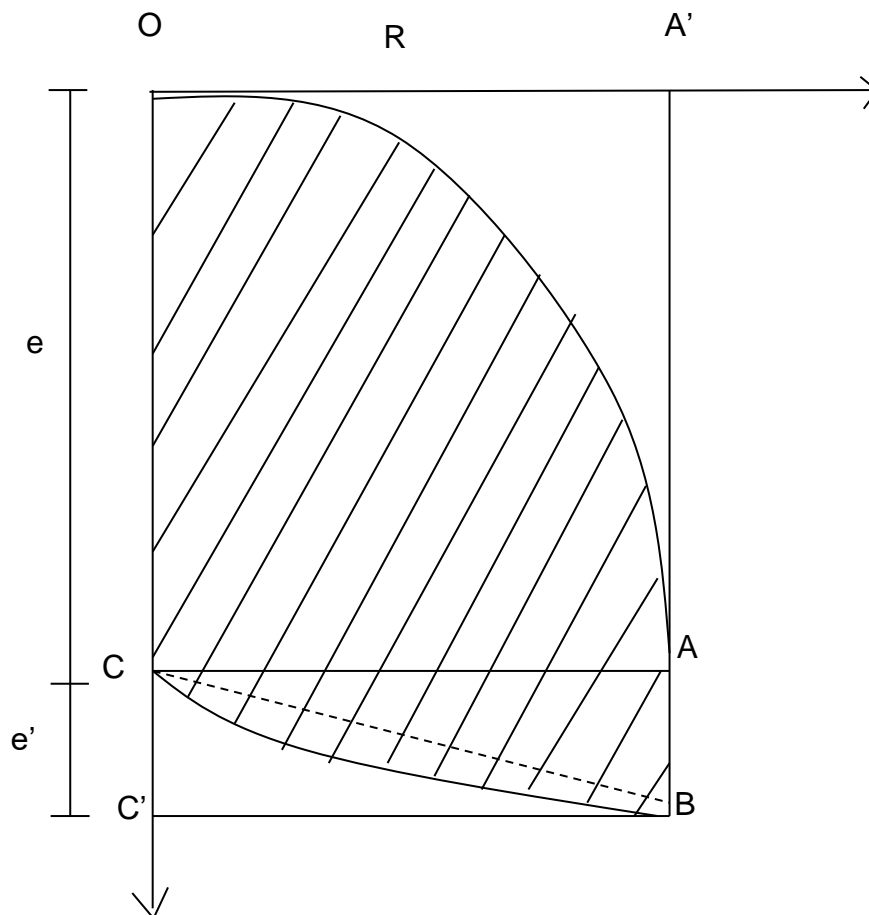
$g = \text{gravedad } 9,81 \text{ m/s}^2$

Normas BAT de geología y geotécnia

1.5 DINÁMICA DEL PDC

A través de la teoría de dinámica de choques y de la curva esfuerzo – deformación (Figura 3), es posible deducir la fuerza estática R la cual producirá una penetración permanente que simule la penetración obtenida después de un golpe del martillo. El problema consiste en la energía suministrada al cono para que penetre el suelo, ya que esta no es constante, sino que se hace a través de una sucesión interrumpida de golpes.

Figura 3. Curva esfuerzo Deformación



La fuerza R de rechazo es la simulación estática de la energía dinámica aplicada por el conjunto de golpes para penetrar interrumpidamente cualquiera que sea la profundidad de la auscultación.

Se hace referencia a una simulación porque la mejor manera de interpretar la resistencia de un estrato es a través de una fuerza constante y en realidad se aplica una fuerza interrumpida. De aquí la necesidad del operador en mantener un ritmo estable en la aplicación de los golpes.

El ensayo consiste simplemente en aplicar una serie de golpes, N, en medir la respectiva penetración ΔH , y calcular $e.e = \Delta H / N$: deformación por unidad de golpe.

Con la aplicación de una carga de energía, se desarrollan fuerzas internas en el cuerpo, estas fuerzas varían debido a las deformaciones del miembro. La energía de deformación del cuerpo se refiere al trabajo realizado por esas fuerzas internas.

Para determinar la energía que le transmite el cono al suelo se debe graficar la deformación producida por una fuerza estática creciente que garantice la misma velocidad de penetración a través de todo el estrato, que la obtenida por un golpe del martillo.

Inmediatamente la fuerza estática haya alcanzado la profundidad total del estrato, el suelo es descargado.

El área bajo la curva corresponde a la energía transmitida al suelo.

Al integrar la ecuación del esfuerzo con respecto a la deformación se obtiene el área debajo de la curva, que no es otra cosa que la energía transmitida al suelo.

Se puede aproximar esta área como la suma del rectángulo OA'AC y el triángulo ABC:

$$E_1 = R \left(\frac{e + e'}{2} \right) \quad (1)$$

e = Deformación plástica permanente

e' = Deformación elástica temporal

La energía E también se puede calcular como la energía potencial del martillo restando las pérdidas después del choque con el yunque.

Si los centros de masas de los dos cuerpos que chocan se localizan sobre la normal común a la superficie en contacto, el choque es un choque central. En caso contrario, se dice que el choque es excéntrico. Se limitará el análisis al choque central de dos partículas ya que el golpe que el martillo da al yunque sucede en la dirección del eje que atraviesa los centros de masas de ambos cuerpos.

En el caso específico de la percusión entre la masa y el yunque el choque es central directo, ya que las velocidades de las partículas antes del choque están dirigidas a lo largo de la línea del choque.

Considérese primero dos partículas como un solo sistema, el mazo y las varillas, como no hay fuerza externa a este sistema el momento lineal total se conserva, por consiguiente se escribe:

$$m * V_0 + m' * V_0' = m * V_1 + m' * V_1' \quad (2)$$

Donde:

m = masa del martillo

m' = masa de las varillas y el yunque

V_0 y V_1 = velocidad inicial y final del martillo

V_0' y V_1' = velocidad inicial y final de las varillas y el yunque.

El coeficiente de las magnitudes de los impulsos que corresponden al período donde los cuerpos deformados se restituyen o no de acuerdo a la magnitud del choque y el tipo de material se llama coeficiente de restitución (cr).

Posterior a una percusión, la diferencia de las velocidades finales debe ser igual a la diferencia de las velocidades iniciales multiplicada por el coeficiente de restitución.

$$V_1' - V_1 = cr * (V_0 - V_0') \quad (3)$$

En choques perfectamente plásticos no hay período de restitución y las partículas permanecen unidas después del impacto; $cr = 0$ en este caso, y la velocidad final del mazo sería igual a la velocidad final de las varillas.

En un choque perfectamente elástico $cr = 1$ esto indicaría que las velocidades relativas antes y después del choque son iguales. Es decir, las partículas se alejan después del choque con la misma velocidad con que se acercaron.

El caso del penetrómetro no se encuentra en ninguno de los dos extremos ya que $0 < cr < 1$ y por ello se hace referencia a la ecuación (3).

La velocidad de las varillas $v_0' = 0$, por lo que se tiene:

$$M \cdot v_0 = m \cdot v_1 + m' \cdot v_1' \quad (2A)$$

$$v_1' - v_1 = cr \cdot v_0 \quad (3A)$$

La velocidad inicial del mazo se puede determinar como: $\sqrt{2gh}$

La energía después del choque se puede calcular como la energía cinética de las dos partículas en ese momento:

$$\frac{1}{2} m v_1^2 + \frac{1}{2} m' v_1'^2 = E_1 \quad (4)$$

Se deben expresar las velocidades finales en términos de las velocidades iniciales.

De la ecuación (3 A) se tiene:

$$v_1' = cr \cdot v_0 + v_1 \quad (5)$$

y de la ecuación (2A) se tiene que:

$$v_1' = \frac{mv_0 - mv_1}{m'} \quad (6)$$

Igualando (5) y (6):

$$crv_0 + v_1 = \frac{mv_0 - mv_1}{m'}$$

$$m'crv_0 + m'v_1 = mv_0 - mv_1$$

$$(m' + m)v_1 = mv_0 - m'crv_0$$

$$v_1 = \frac{v_0(m - m'cr)}{m' + m} \quad (7)$$

Y

$$\begin{aligned}
v_1' &= \frac{mv_0 - m'crv_0}{m'+m} + crv_0 \\
v_1' &= \frac{mv_0 - m'crv_0 + crv_0m' + crv_0m}{m'+m} \\
v_1' &= \frac{mv_0 + crv_0m}{m'+m} \\
v_1' &= \frac{(m + mcr)v_0}{m'+m} \quad (8)
\end{aligned}$$

Reemplazado (7) y (8) en (4) se obtiene:

$$\begin{aligned}
\frac{1}{2}m \left[\frac{v_0(m - m'cr)}{m'+m} \right]^2 + \frac{1}{2}m' \left[\frac{(m + mcr)v_0}{m'+m} \right]^2 &= E_1 \\
\frac{1}{2}m \frac{v_0^2}{(m'+m)^2} \left[(m - m'cr) + m'm(1 + cr)^2 \right] &= E_1 \\
\frac{1}{2}m \frac{v_0^2}{(m'+m)^2} \left[m^2 - 2mm'cr^2 + m'^2cr^2 + m'm + 2m'mcr + m'mcr^2 \right] &= E_1 \\
\frac{1}{2}m \frac{v_0^2}{(m'+m)^2} \left[m^2 + m'^2cr^2 + m'm + m'mcr^2 \right] &= E_1 \\
\frac{1}{2}m \frac{v_0^2}{(m'+m)^2} \left[m^2 + m'(m'cr^2 + m + mcr^2) \right] &= E_1 \\
\frac{1}{2}m \frac{v_0^2}{(m'+m)^2} \left\{ m^2 + m'[(m'+m)cr^2 + m] \right\} &= E_1 \\
\frac{1}{2}m \frac{v_0^2}{(m'+m)^2} \left[m^2 + m'(m'+m)cr^2 \right] &= E_1 \\
\frac{1}{2}mv_0^2 \left[\frac{m + m'cr^2}{m'+m} \right] &= E_1 \quad (9)
\end{aligned}$$

Por conservación de la energía se tiene que los grupos en caída libre tiene una velocidad igual a: $\sqrt{2gh}$

La velocidad del martillo $V_0 = (2hg)^{1/2}$ antes del choque, entonces:

$$E_1 = mgh \left(\frac{m + m'cr^2}{m' + m} \right) \quad (10)$$

Igualando (1) y (10):

$$R \left(e + \frac{e'}{2} \right) = mgh \left(\frac{m + m'cr^2}{m' + m} \right)$$

$$\Rightarrow R = \frac{mgh \left(\frac{m + m'cr^2}{m' + m} \right)}{e + \frac{e'}{2}}$$

Si:

$W_r = mg =$ Peso del martillo

$h =$ Altura de caída

$W_p = m'g =$ Peso del penetrómetro menos el del martillo

$cr =$ Coeficiente de restitución

$R =$ Resistencia a la penetración

Resulta:

$$R = W_r h \frac{\frac{W_r + W_p cr^2}{W_p + W_r}}{e + \frac{e'}{2}} \quad (11)$$

El término e' representa el acortamiento que sufre la barra con el impacto del martillo; si se tratara de tener una aproximación por debajo del milímetro, a la medida que se observa en la regla se le debería restar la deformación axial sufrida por la barra.

Sin embargo, no es posible para el operador aproximar las lecturas realizadas durante el ensayo más allá del milímetro, esto sumado a las consideraciones complejas de tipo teórico necesarias para calcular e' y la poca incidencia que este valor ha demostrado tener (según los sudafricanos), en los resultados finales ha llevado a la conclusión de despreciar e' . Entonces:

$$R = W_r h \frac{W_r + W_{pcr}^2}{W_p + W_r} \frac{1}{e}$$

Donde e = profundidad de penetración.

1.6 CORRELACIÓN ENTRE EL PDC Y EL CBR

Actualmente muchas instituciones de investigación de diversos lugares del mundo han desarrollado metodologías tendientes a correlacionar el Índice Dinámico de Penetración (PDC), del ensayo PDC con parámetros de evaluación de la capacidad de soporte.

Entre estas investigaciones se destacan las realizadas por el Centro de Investigaciones Viales (C.B.R) de Bélgica, por el Departamento de Rutas de Transvaal Sudáfrica, por el Departamento de Transporte de Minesota, que han desarrollado algunas correlaciones entre el CBR y el PDC.

El objeto de esta investigación es determinar una correlación entre el PDC y el CBR.

2. USOS Y VENTAJAS DEL EQUIPO

El Penetrómetro Dinámico de Cono dentro del campo de la ingeniería civil proporciona mecanismos de utilización que facilitan al ingeniero su trabajo y disponibilidad de tiempo, entre los usos más destacados se encuentran: terraplenes, capas de fundación y evaluación de pavimentos.

La velocidad con la cual el trabajo puede llevarse a cabo, además del área que puede cubrirse, hacen del PDC un instrumento adecuado para el control de densidad, particularmente en el caso de grandes terraplenes.

2.1 TERRAPLENES

Al momento de construir terraplenes es de considerar que la supervisión puede realizarse con el uso del PDC. Básicamente puede emplearse uno de los siguientes métodos:

1. Correlacionar el PDC con el método ordinario del cono y arena para obtener una curva de PDC contra densidad.
2. La relación humedad – densidad / humedad –PDC. En este caso dos densidades diferentes pueden deducirse del número PDC pero debido a que uno de estos resultados refleja la condición “por encima de la optima” puede ignorarse, debido a que en la practica es imposible compactar un material con un contenido de humedad “por encima de la optima” sin que un levantamiento tenga lugar.

Los métodos de arriba dependen de condiciones y propiedades tales como, contenido de humedad, plasticidad y gradación las cuales tienen un efecto

sobre el PDC, debiendo permanecer relativamente constantes de modo que pueda supervisarse la densidad.

2.2 CAPAS DE FUNDACIÓN

En el caso de capas estabilizadas la rata de penetración es menor usualmente inferior a 2.5 mm/golpe y con una excepcional estabilización puede ser menor a 0.5 mm/golpe, lo cual puede ser lento para propósitos prácticos.

La utilidad del PDC, especialmente con la representación gráfica, indica claramente un desigual mezclado o compactación en una misma capa. Esto quiere decir que aunque el promedio de densidad de una capa puede ser aceptable, la curva PDC identifica una mitad inferior inaceptable.

El uso del PDC no es considerado una práctica normal sobre bases trituradas, ya que debe hacerse un juicio extremadamente cuidadoso sobre los resultados obtenidos.

2.3 EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS

Cuando un pavimento debe rehabilitarse, es necesario decidir si la mejor solución serán capas adicionales o una reconstrucción, una evaluación previa con el PDC puede ser de gran valor.

Con el uso del PDC puede determinarse si son las capas superiores o las inferiores las que presentan problemas.

Al realizar una evaluación del equipo se debe tener en cuenta:

- ✦ Utilización en capas granulares de firme.
- ✦ Medida de la resistencia a la penetración.
- ✦ Determinación de espesores de las capas de firme.
- ✦ Evaluación de la capacidad portante de las capas de firme (correlación con índice CBR).
- ✦ Evaluación de las características mecánicas de los materiales de las capas de firme (correlación con el módulo de deformación).
- ✦ Realizar de manera rápida una auscultación in situ de las capas del suelo, permitiendo a la vez determinar los lugares en que es necesario realizar calicatas. Lo anterior, sería muy útil para los estudios de proyectos viales pues, permitiría un mayor conocimiento de las capas del suelo.
- ✦ Identificación de tramos homogéneos con características estructurales similares.
- ✦ Bajo costo de operación; Ensayo casi no destructivo; Repetitividad de resultados.
- ✦ El PDC es un equipo sencillo, confiable de bajo costo operacional, factible de realizar en Chile.

2.4 LIMITACIONES

- ✦ A pesar de tener limitaciones de uso, dado que no es aconsejable para suelos granulares con tamaños superiores a 2", la calidad y la cantidad de información que entrega cuando es factible de realizar, lo hace una herramienta de indudables perspectivas para los proyectos e investigaciones viales.
- ✦ El clima es una variable significativa en el desempeño del ensayo, pues las mediciones en un terreno seco serán confiables, mientras en un terreno húmedo debido a la lluvia no lo serán tanto.

- ⊕ Otra variable que afecta en gran medida el suelo, para oráculos altamente plásticos el ensayo es preciso hasta profundidades aproximadamente de 30 cm. Después de esta profundidad la adherencia de la arcilla al equipo afecta la veracidad del ensayo, para esto se debe engrasar la varilla de penetración evitando así la fricción con el suelo.
- ⊕ El ensayo al realizarlo, no presenta penetración deberá ser suspendido y continuado después de barrenar o realizar en otro sitio cercano.
- ⊕ Para suelos que contengan arena suelta y relativamente seca, la penetración se dificulta en los primeros centímetros y posteriormente se incrementa un poco.
- ⊕ El PDC no se puede aplicar a aquellos suelos granulares, en presencia de concretos o material vegetal, este debe ser retirado para su realización, además, por ser un equipo manual puede cometerse una serie de desviaciones en las lecturas de su medición.

3. CANTERAS

Se consideran como canteras los siguientes lugares:

- ⊕ Donde se explote para la extracción de minerales y piedras de balastro, materiales para terraplenes y bases de carreteras, hormigones y mezclas.
- ⊕ Graveras, hoyos de arena y otras extracciones de aluvión.

La calidad de un producto de cantera condiciona evidentemente su utilización.

Existe en efecto, una infinidad de materiales con propiedades físicas muy diversas. Como materiales considerados, serán destinados a la construcción de vías, deben poseer determinadas cualidades bien definidas, las cuales deben ajustarse a una serie de normas o especificaciones como son las de INVIAS y AASHTO.

A la vez, hay que tener en cuenta que la variabilidad existe no solo de una cantera a otra sino, incluso de la misma cantera. Lo mismo sucede en lo que se refiere al potencial de explotación, a menudo ocurren sorpresas, y se han visto yacimientos agotados antes de haber permitido la amortización de los capitales invertidos, consecuencia de débiles investigaciones exploratorias.

Por esta razón, antes de decidirse por una cantera, es necesario conocer la extensión del yacimiento, su potencial, sus características y la calidad del producto.

3.1 CANTERA MUNARRIZ

Nombre: Cantera Munárriz y Hermanos

Propietario: Jorge Munárriz

Localización: Puerto Colombia Km 7 Vía al mar

Materiales: Polvillo MK, caliche amarillo, gravilla tipo calizo, granzón tipo calizo, triturado tipo calizo.

Potencial de explotación: 1500 m³/mes a 20 años. El potencial está estimado aproximadamente en 3'500.000m³ de material.

Equipos: Cargador, Bulldozer, Clasificadora portátil, Trituradora, Equipo de Perforación. En algunas ocasiones se hace necesario el uso de explosivos.

Acceso: El acceso es por la vía que de Barranquilla conduce a Cartagena (vía al mar) a la altura del kilómetro 7.

Observaciones: Puede comprarse el material mezclado en cualquier proporción requerida. Comúnmente se está utilizando para subbases una mezcla de 10% caliche y 30% de los tres agregados grueso. Para base se utiliza un 50% en material de subbase y 50% de los tres agregados gruesos.

3.2 CANTERA OCHOA

Nombre: Molinos Ochoa

Propietario: Elkin Ochoa

Localización: Puerto Colombia Km 11 Vía al mar

Materiales: Polvillo blanco, arena, caliche blanco, gravilla tipo calizo, triturado tipo calizo.

Potencial de explotación: No se tiene datos con los cuales se pueda estimar el potencial de explotación.

Equipos: Bulldozer, Cargadores, Trituradora.

Acceso: El acceso es por la vía que de Barranquilla conduce a Cartagena (vía al mar) a la altura del kilómetro 11.

Observaciones: La cantera cuenta con una gran extensión de terreno apto para la extracción de material pero en la actualidad no se explotan debido a disputas legales de estos predios.

4. CARACTERISTICAS GEOLÓGICAS

La conformación geológica de las canteras en estudio (MUNÁRRIZ y OCHOA) ubicadas en el Departamento del Atlántico es el resultado portentoso de las fuerzas constructivas del paisaje y por consiguiente su origen es relativamente reciente.

4.1 GEOLOGÍA

La geología del Atlántico esta constituida casi totalmente por formaciones sedimentarias del terciario y depósitos cuaternarios recientes.

En general, son rocas de diferentes orígenes las cuales fueron arrancadas de los flancos de las cordilleras por los grandes ríos interandinos del sistema fluvial y también por las sedimentaciones marítimas, especialmente de origen calcáreo, que se depositaron a lo largo de la costa.

Las primeras formaciones terciarias (paleoceno) fueron en su gran mayoría depositadas en ambiente marino, con sedimentos provenientes de la cordillera central y occidental durante épocas de gran tectonismo continental.

La etapa intermedia del terciario (eoceno y oligoceno) se caracterizó por depósito de sedimentos finos en ambiente marino rico en aporte calcáreo y fosilífero.

Las formaciones más jóvenes del final del terciario (plioceno) se depositaron de nuevo en un ambiente marino tranquilo y no sufrieron mayor tectonismo, aunque si la acción erosiva de los grandes ríos.

Los materiales del terciario, generalmente, ocupan las posiciones de colinas, las cuales ofrecen diferentes características en sus formas y pendientes, de acuerdo con los procesos tectónicos y climáticos que han dado origen a una decisión variable.

Dentro de las colinas, se presentan varias formaciones según la edad, litología y espesor de los materiales.

Así se tiene que dentro del plioceno figuran las formaciones la Popa y Sabanalarga; en el mioceno están las formaciones Chorrera, Juan de Acosta, Saco, Tubará, Piojó, Gallinazo e Hibacharo. En el oligoceno, eoceno, y paleoceno, figuran respectivamente las formaciones denominadas Perdices, Arroyo de Piedra (o San Jacinto) y Luruaco.

El sitio preciso de Barranquilla, se halla sentado sobre un afloramiento muy consolidado del presente plioceno. Es una formación de unos 20 m de espesor promedio, formado por capas de margas, calizas, shales² de alto poder expansivo, coralinas y areniscas en matriz arcillosa calcárea.

Los materiales del cuaternario son de origen aluvial, lacustre, fluvio-lacustre, marino y eólico, los cuales ocupan posiciones geomorfológicas tales como orillares, diques, terrazas, rebordes de ciénagas, pantanos, playones y dunas.

La zona nor-oriental del departamento es rica en depósitos de este tipo, formados generalmente por la descomunal sinuosidad del río Magdalena y muy variables, por consiguiente, en su composición granulométrica.

² _____. Atlas Geológico. [www. Ingeomin.gov.co/web/mapas](http://www.Ingeomin.gov.co/web/mapas) (vía Internet)

Los sedimentos de origen aluvial son aquellos depositados por acción de los ríos y los arroyos que cruzan el departamento. Están constituidos por materiales de espesor y composición variable.

Los materiales de origen lacustre y fluvio-lacustre son predominantemente de texturas finas y fueron depositadas a partir de cuerpos de aguas más o menos tranquilas y permanentes. A estos cuerpos de agua, lacustre tuvo acceso al mar durante los periodos de transgresión, lo cual explica en parte los problemas de salinidad y alcalinidad que afectan a muchos de los suelos.

Donde ha presentado influencia aluvial muy activa, hay más variación en la naturaleza y textura de los materiales, como ocurren en algunos sectores de la zona desecada de antiguas ciénagas del sur del Atlántico.

Los sedimentos de origen marino y fluvio-marino pueden ser de texturas arenosas o arcillosas. Son de espesor variable, de carácter salino, generalmente con inclusiones de moluscos y se encuentran principalmente en la zona del litoral, en posiciones fisiográficas tales como: barras, playones, pequeñas cubetas y terrazas.

Los sedimentos eólicos han dado lugar a la formación de sistemas de dunas de diversas edades y composición mineralógica. Las dunas más recientes se encuentran ubicadas en las colinas bajas entre Barranquilla y Puerto Colombia.

Las dunas más antiguas están en el sector centro-oriental del departamento y alcanzan varios kilómetros de longitud.

En el aspecto geomorfológico, esta región es de mesetas bajas en el proceso de peniplanización al cual han influido fenómenos naturales de denudación

externa tales como: la acción de las lluvias, las escorrentías en un menor grado, la acción de los vientos y el mar.

En general, la morfología suavemente ondulada del departamento del Atlántico responde a la presencia de estructuras anticlinales y sinclinales con algunos desplazamientos causados por dislocaciones diagonales que en conjunto evidencia el moderado tectonismo regional (figura 4).

Detallando un poco más las áreas geológicas y la estratigrafía del area de Barranquilla se puede describir su desarrollo geológico de tal forma:

Las rocas expuestas en el area de Barranquilla, como ya se dijo, son principalmente sedimentarias, y sus edades van desde el pre-cretácico al cuaternario reciente (tabla 1).

Figura 4. Geomorfología de la ciudad de Barranquilla



Tabla 1. CRONOLOGÍA GEOLÓGICA DE LA CIUDAD DE BARRANQUILLA					
ERA	PERIODO	ÉPOCA	TIPO DE FORMACION	SITIOS DONDE AFLORAN	COMPOSICIÓN
RECIENTE	CUATERNARIO	Reciente	Depósitos superficiales.	Riberas del Río Magdalena.	Aluviones, colusiones, depósitos lacustres y marinos.
			Depósitos consolidados.	Valle del Magdalena	Aluviones, arenas y gravillas en ambiente marino
	TERCIARIO	PLIOCENO	Formación Barranquilla o Popa.	Inmediaciones de la ciudad de B/quilla y del municipio de Pto Colombia, Sabanilla, Orellano, Buenavista, Zona de Pagano, Zona de el Tabor.	Rocas calizas, coralinas, margas, calizas y magnesioanos y areniscas calcáreas.
			Formación Sabanalarga.	Inmediatamente del municipio de Sabanalarga.	Areniscas y calizas con intercalaciones de shales.
			Formación Chorrera.	Depresión sinclinal de Tubará y lado oeste del afloramiento de L/co.	Aluviones semi-resistentes, shales y areniscas.
		MIOCENO MEDIO	Formación Juan de Acosta.	Inmediaciones del municipio de Juan de Acosta.	Calizas arenosas y shales renosos.
			Formación Saco.	Inmediaciones del municipio de Saco Flancos norte y este del sinclinal Tubará.	Shales arenosos, semiresistentes, shales y areniscas.
			Formación Tubará.	Canteras de la Playa, el Campito, Sierra Vieja, S/grande, Z de Barranca N.	Shales suaves y calizas arenosas duras.
		MIOCENO BAJO	Formación Piojo.	Flancos norte y oeste del sinclinal de Tubará.	Shales con algunas zonas de calizas arenosas y areniscas.
			Formación Gallinazo.	Flancos norte y oeste del sinclinal de Tubará.	Areniscas, calizas y shales
			Formaciones Hibacharo y Cibarco.	Tierras montañosas al oeste del río Magdalena.	Shales con poco contenido de calizas y areniscas.
		MIOCENO OLIGOCENO OLIGOCENO	Formación las Perdices.	Tierras altas del oeste del río Magdalena, Sur de B/quilla.	Caliza cristalina, arcilla con delgadas bandas de conglomerados.
			Formación San Jacinto.	Inmediaciones del municipio de Arroyo de Piedra.	Areniscas micaceas y arcillas con delgadas bandas de conglomerados.
			Formación Luruaco.	Inmediaciones del municipio de Luruaco.	
		MESOZOICA	SECUNDARIO	PRE-CRETÁCICO	Rocas ígneas y metamórficas

4.2 GEOLOGÍA DE LA CIUDAD DE BARRANQUILLA.

Barranquilla está localizada entre dos formaciones típicas: la capa superior es llamada la "formación Barranquilla", y la capa inferior, la cual amenaza con aparecer en la superficie de la parte sur, y es llamada la "Formación Las Perdices".

La disposición geológica de los estratos que conforman el subsuelo de Barranquilla está constituida de la siguiente forma.

4.2.1 Calizas arenosas, margosas y margas, rocas coralinas. De color amarillo y blanco constituyen la formación Barranquilla; es una costra resistente conocida en la localidad como caliche y es un excelente material de fundación. Su espesor medio es de 12 metros. Aparece superficialmente o cubierto por un depósito de arena limpia amarilla rojiza de 5 a 7 metros de espesor, también de origen sedimentario.

En las riberas del río, la caliza se sumerge hasta alcanzar profundidades de 12 a 17 metros, estando cubiertos ahora por blandos sedimentos fluviales limo arenoso de color gris oscuro. También hacia la parte norte, se pueden ver estos depósitos en cercanías del río cubiertos por alrededor de 15 metros de médanos³, que son arenas uniformes de grano fino, de color gris, de origen eólico.

La capa de calizas se encuentra en un sector hacia el norte, en bandas, alternando con vetas arcillosas grises de más o menos 0.15 metros e incluyen nódulos de yeso.

³ _____. Exploración del Subsuelo mediante PDC. [www. Ingenieríageológica.iespuma.es/](http://www.Ingenieríageológica.iespuma.es/) (vía Internet)

A continuación de los mantos anteriores, se encuentran estrato de arena y arenisca de hasta 17 metros de espesor.

Esta formación presenta fases donde la erosión de arrecifes coralinos dio origen al cemento calcáreo de algunas de las masas pleistoceas y depósitos cuaternarios de carácter arenoso y arcilloso, que explican su fuerte variabilidad superficial. Esta última característica, unida al hecho de que la gran capacidad portante del caliche incita a la utilización de altas fatigas de contacto, introduce un enorme riesgo, ante problemas de disolución por saturación, presencia de bolsas de material arcilloso y otras similares que ameriten un ejercicio geotécnico muy cuidadoso y la necesidad de investigación.

4.2.2 Arcillas. Debajo de las calizas y areniscas, o aflorando en el área sur se encuentran las arcillas azules de Barranquilla, las cuales corresponden a la 'Formación Las Perdices'. Son sedimentos marinos cuya consistencia dura está afectada por fisuras, originadas por fenómenos tectónicos y orogénicos, durante su proceso de formación y emersión.

El espesor de la arcilla, no determinado aun, según investigaciones para la búsqueda de yacimientos petrolíferos, indican que pueden superar 1.5 kilómetros. Estas arcillas aparecen hacia el sur, en algunos sectores cubiertos por areniscas en matriz arcillosa y cementos calcáreos; son muy compactas y de espesores hasta de 5 metros.

La alta frecuencia con que aparecen en el casco urbano, constituyen un serio problema para la construcción de obras civiles de infraestructura y la cimentación segura de todo tipo de estructuras. Galapa, la Cordialidad, la Cárcel de Barranquilla, Las Terrazas, El Pueblo, El Silencio, son nombres

que han ido familiarizado a la comunidad con la indeseable acción del celebre "barro gallego" de la región.

4.2.3 Depósito de arenas limosas de origen marino o aluvial.

Generalmente calcáreas, con abundantes restos de vida orgánica marina y poco consolidadas, constituyen otra barrera geológica a la acción de la Ingeniería Civil en muchos sitios de la ciudad e introducen riesgos de licuación de arenas en situaciones sísmicas.

4.2.4 Depósitos de limos y arenas muy finas eólica. Generalmente circunscritos a las riberas del Río Magdalena en la zona industrial de la Vía 40, constituyen un material de muy delicada evaluación y manejo en la construcción de obras civiles.

4.2.5 Afloramientos de areniscas friables cementadas en matriz arcillosa. Altamente erosionable, por disolución de su fuerte presencia en el área, es llamada a tener un fuerte desarrollo industrial, comercial, en el futuro como la Central de Abastos, Estadio de Fútbol, Ciudadela 20 de Julio, ampliación de la Calle Murillo, Autopista al Aeropuerto, sólo para mencionar algunas de las principales obras existentes en la zona, constituyen un tema obligatorio de estudio.

5. PAVIMENTOS

Pavimento es un conjunto de capas de materiales seleccionados, comprendidos entre la subrasante y la superficie de rodamiento o rasante. El pavimento tiene como funciones primordiales proporcionar una superficie de rodamiento uniforme, resistente a la acción del tránsito y del clima, así como transmitir en forma adecuada a la subrasante los esfuerzos generados por las cargas de tránsito.

5.1 CARACTERÍSTICAS DEL PAVIMENTO

Un pavimento para cumplir adecuadamente sus funciones debe reunir los siguientes requisitos:

- ⊕ Ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el tránsito.
- ⊕ Ser resistente ante los agentes de intemperismo.
- ⊕ Tener una textura adecuada para el rodamiento.
- ⊕ Ser durable y económico.
- ⊕ Facilitar el drenaje de la vía.
- ⊕ Poseer el color adecuado para evitar reflejo y deslumbramiento.

5.2 TIPOS DE PAVIMENTOS

En el medio se pueden hallar cuatro (4) tipos de pavimentos: Pavimentos flexibles, pavimentos semi-rígidos, pavimentos rígidos y pavimentos articulados. Sin embargo, dadas las características de esta monografía tan sólo los pavimentos flexibles serán considerados.

5.2.1 Pavimento Flexible. Este tipo de pavimento esta formado por una carpeta bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la subbase. No obstante puede prescindirse de cualquiera de estas capas dependiendo de las necesidades particulares de cada obra.

5.2.2 Funciones de las Capas de un Pavimento Flexible.

a. Subbase granular. Es la capa ubicada por debajo de la base granular y sobre la subrasante, bien sea natural o mejorada. La subbase tiene las siguientes funciones:

- ⊕ Transmitir en forma adecuada a la subrasante los esfuerzos que el tránsito le impone a través de la base.
- ⊕ Formar una capa de transición entre los materiales finos de la subrasante y los gruesos de la base de modo que evite la contaminación interpenetración de ellos.
- ⊕ Disminuir los efectos perjudiciales producidos por los cambios volumétricos de los suelos de subrasante.
- ⊕ Reducir los costos bajando la calidad del material utilizado para la conformación de la estructura del pavimento.
- ⊕ En ocasiones puede contribuir al drenaje.

b. Base granular. Es la capa ubicada por debajo de la carpeta asfáltica y sobre la subbase granular. La base tiene las siguientes funciones:

- ⊕ Soportar adecuadamente las cargas que los vehículos le trasmiten a través de la carpeta y distribuir los esfuerzos recibidos en magnitudes adecuadas a las capas inferiores a fin de evitar se produzcan deformaciones perjudiciales.
- ⊕ Reducir costos

c. Carpeta Asfáltica. Es la capa superior de la estructura de un pavimento flexible al estar ubicada sobre la base granular. Tiene las siguientes funciones:

- ⊕ Proporcionar una superficie uniforme y estable al uso, de textura y color convenientes y resistir los efectos abrasivos del tránsito.
- ⊕ Impedir el paso del agua al interior del pavimento.
- ⊕ Proveer la resistencia a la tensión complementando la capacidad estructural del pavimento.

5.3 MATERIALES PARA BASES Y SUBBASES DE PAVIMENTOS

Los materiales y/o mezclas utilizados como bases o subbases de pavimentos rígidos o flexibles deben cumplir con una serie de requisitos de calidad, para que de esta manera proporcionen al pavimento las condiciones de seguridad, costo y funcionalidad para las que fue diseñado; es por esto que organismos como son INVIAS en Colombia y AASHTO a nivel internacional han establecido ciertos parámetros o requisitos de Calidad para estos que garanticen las condiciones antes mencionadas.

Después de la identificación de los materiales existentes en las canteras del Departamento y de la selección de aquellas a estudiar en esta monografía, se prosigue a conseguir materiales que por si solos se ajusten a las normas, de no ser así, proponer mezclas de dos o mas materiales para cumplan con las especificaciones establecidas por las normas.

5.4 PAVIMENTOS FLEXIBLES

Para este tipo de pavimentos se consideraron las especificaciones técnicas establecidas por el Instituto Nacional de Vías, INVIAS; Las cuales basan el

control de calidad de los materiales para subbases en los ensayos de: Granulometría, Plasticidad, Desgaste mecánico, pérdida de solidéz ante sulfatos, Equivalente de arena, Próctor y C.B.R.; para el caso de bases además de los antes mencionados se realizan los de Porcentaje de caras fracturadas e índices de aplanamiento y alargamiento.

Debido a la complejidad, costos y la poca aplicación de algunos de estos ensayos actualmente, se estableció un orden lógico para la ejecución de las pruebas de laboratorio a saber: Granulometría, Plasticidad. Los soportes de cada uno de estos ensayos se muestran en los anexos E, F, G y H.

6. DEFINICIÓN DE ENSAYOS A UTILIZAR

Para analizar los materiales provenientes de las canteras MUNÁRRIZ y OCHOA, se hace necesario realizar cierto número de ensayos que permitan identificar claramente las propiedades de estos. Existen unos ensayos que se realizarán los cuales forman parte de un proceso preliminar, y otros que definen el objeto de este estudio.

Los primeros corresponden a: Gradación, Límites de Attemberg, Humedad Natural, Próctor Modificado y Densidad en campo (cono y arena). Los segundos los conforman: CBR en laboratorio y Penetrómetro Dinámico de Cono.

6.1 CLASIFICACIÓN DE SUELOS

En la actualidad existen gran número de métodos para clasificar suelos, pero cada uno de ellos tiene su campo de aplicación según la necesidad y uso que los fundamenta (figura 5).

Los métodos más utilizados para clasificación de suelos, en estudios para pavimentos de carreteras y aeropistas son el sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S) y el de la Asociación Americana de Agencias Oficiales de Carreteras y transportes (A.A.S.H.T.O.).

6.1.1 Clasificación de suelos A.A.S.H.T.O. De acuerdo con este método los suelos están clasificados en ocho grupos (A-1 hasta A-8).

En este sistema los suelos se clasifican en inorgánicos que van desde la A-1 hasta A-7, los cuales se subdividen en doce subgrupos.

Los suelos con elevada proporción orgánica (turbas) se clasifican como A-8.

Figura 5. Granulometría



1.) Descripción de los grupos de clasificación.

a) Suelos granulares: Son aquellos que tienen 35% o menos, del material fino que pasa el tamiz No. 200. Estos suelos forman los grupos A-1, A-2 y A-3.

⊕ **Grupo A-1:** El material de este grupo comprende las mezclas bien graduadas, compuestas de fragmentos de piedra, grava, arena y material ligante poco plástico. Se Incluyen también en este grupo mezclas bien graduadas que no tienen material ligante.

- **Subgrupo A-1a:** Comprende aquellos materiales formados predominantemente por piedra o grava, con o sin material ligante bien graduado.

- **Subgrupo A-1b:** Incluye aquellos materiales formados predominantemente por arena gruesa bien graduada, con o sin ligante.

⊕ **Grupo A-2:** Comprende una gran variedad de material granular que contiene menos del 35% del material fino.

- **Subgrupos A-2-4 y A-2-5:** Pertenecen a estos Subgrupos aquellos materiales cuyo contenido de material fino es igual o menor del 35% y cuya fracción que pasa el tamiz numero 40 tiene las mismas características de los suelos A-4 y A-5, respectivamente.

Estos grupos incluyen aquellos suelos gravosos y arenosos (arena gruesa), que tengan un contenido de limo, o índices de Grupo, en exceso a los indicados por el grupo A-1. Así mismo, incluyen aquellas arenas finas con un contenido de limo no plástico en exceso al indicado para el grupo A-3.

- **Subgrupos A-2-6 Y A-2-7:** Los materiales de estos subgrupos son semejantes a los anteriores, pero la fracción que pasa el tamiz numero 40 tienen las mismas características de los suelos A-6 y A-7, respectivamente.

⊕ **Grupo A-3:** En este grupo se encuentran incluidas las arenas finas, de playa y aquellas con poca cantidad de limo que no tengan plasticidad. Este grupo incluye, además, las arenas de río que contengan poca grava y arena gruesa.

b) Suelos finos limo-arcillosos: Contienen más del 35% del material fino que pasa el tamiz número 200. Estos suelos constituyen los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7.

⊕ **Grupo A-4:** Pertenecen a este grupo los suelos limosos poco o nada plásticos, que tienen un 75% o más del material fino que pasa el tamiz número 200. Además, se incluyen en este grupo las mezclas de limo con grava y arena hasta en un 64%.

⊕ **Grupo A-5:** Los suelos comprendidos en este grupo son semejantes a los del anterior, pero contienen material micáceo o diatomáceo. Son elásticos y tienen un límite líquido elevado.

⊕ **Grupo A-6:** El material típico de este grupo es la arcilla plástica. Por lo menos el 75% de estos suelos deben pasar el tamiz número 200, pero se incluyen también las mezclas arcillo-arenosas cuyo porcentaje de arena y grava sea inferior al 64%. Estos materiales presentan, generalmente, grandes cambios de volumen entre los estados seco y húmedo.

⊕ **Grupo A-7:** Los suelos de este grupo son semejantes a los suelos A-6 pero son elásticos. Sus límites líquidos son elevados.

⊕ **Grupo A-7-5:** Incluye aquellos materiales cuyos índices de plasticidad no son muy altos con respecto a sus límites líquidos.

- **Subgrupo A-7-6:** Comprende aquellos suelos cuyos índices de plasticidad son muy elevados con respecto a sus límites líquidos y que, además, experimentan cambios de volumen extremadamente grandes.

Las características de los diferentes grupos y subgrupos, y el procedimiento de clasificación se presentan en la tabla 2 y tabla 3.

2.) Índice de grupo. Aquellos suelos que tienen un comportamiento similar se hallan dentro de un mismo grupo, y están representados por un determinado índice.

La clasificación de un suelo con un determinado grupo se basa en su límite de líquido, grado de plasticidad y porcentaje de material fino que pasa el tamiz número 200.

Los índices de grupo de los suelos granulares están generalmente comprendidos entre 0 y 4; los correspondientes a los suelos limosos, entre 8 y 12 y los de suelos arcillosos, entre 11 y 20, o más.

Cuando se indica un índice de grupo hay que colocarlo entre paréntesis.

Tabla 2. Clasificación de los suelos por el método AASHTO (1)

Clasificación General	Materiales granulares (35% ó menos, pasa el tamiz No 200)			Materiales limo-arcillosos (Más del 35% pasa el tamiz No 200)			
GRUPOS	A - 1	A - 3*	A - 2	A - 4	A - 5	A - 6	A - 7
Porcentaje que pasa el tamiz:							
No 10 (2,00mm)	-	-	-	-	-	-	-
No 40 (0,425 mm)	50 máx	51 mín	-	-	-	-	-
No 200 (0,075mm)	25 máx	10 mín	35 máx	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín
Características del material que pasa el tamiz No 40 (0,425mm):							
Límite líquido	-	-	-	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
Índice de plasticidad	6 máx	NP	-	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín

* La colocación de A - 3 antes A - 2, se hace únicamente por razones de ordenamiento de canidades

Tabla 3. Clasificación de suelos por el método AASHTO (2)

Clasificación General	Materiales granulares (35% ó menos, pasa el tamiz No 200)							Materiales limo-arcillosos (Más del 35% pasa el tamiz No 200)			
GRUPOS	A - 1		A - 2								A - 7
Subgrupos	A - 1-a		A - 1-b	A - 3	A - 2-4	A - 2-5	A - 2-6				A - 2-7
	A - 1-a	A - 1-b	A - 3	A - 2-4	A - 2-5	A - 2-6	A - 2-7	A - 4	A - 5	A - 6	A - 7-6
Porcentaje que pasa el tamiz:											
No 10 (2,00mm)	50 máx	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
No 40 (0,425 mm)	30 máx	50 máx	51 mín	-	-	-	-	-	-	-	
No 200 (0,075mm)	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 mín	36 mín	36 mín	
Características del material que pasa el tamiz No 40 (0,425mm):											
Límite líquido	-		-	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
Índice de plasticidad	6 máx		NP	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Terreno de fundación	Excelente a bueno	Excelente a bueno	Excelente a bueno					Regular a malo			
* El índice de plasticidad del subgrupo A - 7-5, es igual ó menor a LI=30											
* El índice de plasticidad del subgrupo A - 7-6, es mayor que LI=30											

6.1.2 Clasificación unificada de suelos. Este sistema fue propuesto por Arturo Casagrande como una modificación y adaptación más general a su sistema de clasificación propuesto en el año 1942 para aeropuertos.

Esta clasificación divide los suelos en:

- Suelos de grano grueso
- Suelos de grano fino
- Suelos orgánicos.

Los suelos de grano grueso y fino se distinguen mediante el tamizado del material por el tamiz No. 200.

Los suelos gruesos corresponden a los retenidos en dicho tamiz y los finos a los que lo pasan, de esta forma se considera que un suelo es grueso si más del 50% de las partículas del mismo son retenidas en el tamiz No. 200, y fino si más del 50% de sus partículas son menores que dicho tamiz.

Los suelos se designan por símbolos de grupo. El símbolo de cada grupo consta de un prefijo y un sufijo. Los prefijos son las iniciales de los nombres ingleses de los seis principales tipos de suelos (grava, arena, limo, arcilla, suelos orgánicos de grano fino y turba), mientras que los sufijos indican subdivisiones en dichos grupos.

a) **Suelos gruesos.** Se dividen en gravas (G) y arenas (S) y se separan con el tamiz No. 4, de manera que un suelo pertenece al grupo G, si más del

50% del peso de su fracción gruesa queda retenido en el tamiz No. 4 y pertenecerá al grupo S, en caso contrario.

Tanto las gravas como las arenas se dividen en cuatro grupos (GW, GP, GM, GC) y (SW, SP, SM, SC), respectivamente, como se explica a continuación.

Gravas

- Si el porcentaje de finos, contenidos en la grava, es menor del 5% la grava puede ser bien gradada (GW) si cumple que el coeficiente de curvatura (C_c) presente un valor entre 1 y 3 y el coeficiente de uniformidad (C_u) sea mayor de 4, si no cumple los coeficientes anteriores la grava será mal gradada (GP).

En el símbolo GW, el prefijo G (gravel) se refiere a las gravas y W (Well graded) quiere decir bien graduado.

De igual modo el símbolo GP indica gravas pobremente graduadas o mal graduadas.

- Si el porcentaje de finos, contenido en la grava, es mayor del 12% la grava puede ser GC si los finos son arcilla y GM si los finos son limo.

El símbolo GM indica gravas limosas, en la que el sufijo M proviene del sueco mo, y el símbolo GC indica gravas arcillosas. El sufijo C indica arcilla.

- Si el porcentaje de finos esta entre 5 y 12%, se usa símbolo doble, por ejemplo, GW-GC.

b) Arenas

⊕ Si el porcentaje de finos, contenido en la arena, es menor del 5%, la arena puede ser, bien gradada (SW) si cumple que $1 < C_c < 3$ y $C_u > 6$ si no cumple los coeficientes anteriores, la arena será mal gradada (SP).

⊕ Si el porcentaje de finos, contenido en la arena, es mayor del 12%, la arena puede ser arcillosa (SC), si los finos son arcilla, o limosa (SM) si los finos son limo.

⊕ Si el porcentaje de finos esta entre 5 y 12% se usa símbolo doble, por ejemplo, SP - SM.

Los coeficientes de curvatura (C_c) y de uniformidad (C_u) que permiten comparar y calificar granulometrías se definen así:

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

c) Suelos finos. El sistema unificado considera los suelos finos divididos en tres grupos: limos inorgánicos (M), arcillas inorgánicas (C), limos y arcillas

orgánicos (O). Cada uno de estos suelos se subdivide a su vez, según su límite líquido, en dos grupos cuya frontera es: $LI = 50\%$

Si el límite líquido del suelo es menor de 50 se añade al símbolo general la letra L (Low Compresibility). Si es mayor de 50 se añade la letra H (high compresibility). Obteniéndose de este modo los siguientes tipos de suelos:

ML = Limos inorgánicos de baja compresibilidad.

OL = Limos y arcillas orgánicas de baja compresibilidad.

CL = Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad.

CH = Arcillas inorgánicas de alta compresibilidad.

MH = Limos orgánicos de alta compresibilidad.

OH = Arcillas y limos orgánicos de alta compresibilidad.

Los suelos altamente orgánicos, como las turbas, se designan con el símbolo Pt.

La clasificación de los suelos finos se hace con la carta de plasticidad, en la que sus diferentes zonas aparecen delimitadas por dos líneas básicas: la Línea A que separa las arcillas de los limos y suelos orgánicos; la Línea B que separa los suelos de alta y baja compresibilidad (tabla 4).

Tabla 4. Clasificación Unificada de suelos

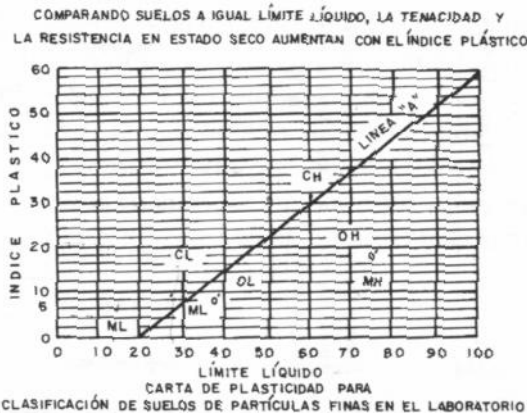
CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO				
SUELOS DE PARTÍCULAS GRUESAS MÁS DE LA MITAD DEL MATERIAL ES RETENIDO EN LA MALLA Nº 200 (Ø)		SUELOS DE PARTÍCULAS FINAS MÁS DE LA MITAD DEL MATERIAL PASA LA MALLA Nº 200 (USESE LA CURVA GRANULOMÉTRICA PARA IDENTIFICAR LAS FRACCIONES DE SUELO)		SÍMBOLOS DEL GRUPO
SUELOS DE PARTÍCULAS GRUESAS MÁS DE LA MITAD DE LA FRACCIÓN GRUESA ES RETENIDA EN LA MALLA Nº 4 (USESE LA CURVA GRANULOMÉTRICA PARA IDENTIFICAR LAS FRACCIONES DE SUELO)	ÁRENAS MÁS DE LA MITAD DE LA FRACCIÓN GRUESA PASA LA MALLA Nº 4 (USESE LA CURVA GRANULOMÉTRICA PARA IDENTIFICAR LAS FRACCIONES DE SUELO)	GW	DETERMINESE LOS PORCENTAJES DE GRASA Y ARENA DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA DEPENDIENDO DEL PORCENTAJE DE FINOS (FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA Nº 200). LOS SUELOS GRUESOS SE CLASIFICAN COMO SIGUIEN: MENOS DE 5% : GW, GP, SW, SP MÁS DE 12% : GM, GC, SM, SC	COEF DE UNIFORMIDAD (C _u) / COEF DE CURVATURA (C _c) $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$, MAYOR DE 4 $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$, ENTRE 1 y 3
		GP		NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GW
		GM		LÍMITES DE PLASTICIDAD ABAJO DE LA LÍNEA "A" O I _p MENOR QUE 6
		GC		LÍMITES DE PLASTICIDAD ARRIBA DE LA LÍNEA "A" CON I _p MAYOR QUE 6
		SW		$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$, MAYOR DE 6 $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$, ENTRE 1 y 3
	GRAVAS MÁS DE LA MITAD DE LA FRACCIÓN GRUESA ES RETENIDA EN LA MALLA Nº 4 (USESE LA CURVA GRANULOMÉTRICA PARA IDENTIFICAR LAS FRACCIONES DE SUELO)	SP		NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA SW
		SM		LÍMITES DE PLASTICIDAD ABAJO DE LA LÍNEA "A" O I _p MENOR QUE 6
		SC		LÍMITES DE PLASTICIDAD ARRIBA DE LA LÍNEA "A" CON I _p MAYOR QUE 6
SUELOS DE PARTÍCULAS FINAS MÁS DE LA MITAD DEL MATERIAL PASA LA MALLA Nº 200 (USESE LA CURVA GRANULOMÉTRICA PARA IDENTIFICAR LAS FRACCIONES DE SUELO)	LIMOS Y ARCILLAS LÍMITE LÍQUIDO MENOR DE 50	ML	EQUIVALENCIA DE SÍMBOLOS G. GRAVA M. LIMO O. SUELOS ORGÁNICOS W. BIEN GRADUADOS L. BAJA COMPRESIBILIDAD S. ARENA CARCILLA P. TURBA P. MAL GRADUADA H. ALTA COMPRESIBILIDAD	
		CL		
		OL		
		MH		
		CH		
	LIMOS Y ARCILLAS LÍMITE LÍQUIDO MAYOR DE 50	OH		
SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS		P _t		

COMPARANDO SUELOS A IGUAL LÍMITE LÍQUIDO, LA TENACIDAD Y LA RESISTENCIA EN ESTADO SECO AUMENTAN CON EL ÍNDICE PLÁSTICO

LÍMITE LÍQUIDO

CARTA DE PLASTICIDAD PARA

CLASIFICACIÓN DE SUELOS DE PARTÍCULAS FINAS EN EL LABORATORIO



Ø- TODOS LOS TAMAÑOS DE LAS MALLAS EN ESTA CARTA SON LOS U.S. STANDARD

6.2 LÍMITES DE ATTEMBERG

Estos definen en gran parte las propiedades de los materiales analizados y corresponden a: límite líquido, límite plástico.

6.2.1 Límite líquido. Es el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico. A este nivel de contenido de humedad el suelo esta en el vértice de cambiar su comportamiento al de un fluido viscoso.

Para este ensayo se utiliza los siguientes equipos:

- ⊕ Tamiz N° 40
- ⊕ Fondo
- ⊕ Casuela de casagrande
- ⊕ Herramienta para hacer ranura
- ⊕ Espátula
- ⊕ Botella plástica con agua
- ⊕ Mortero de porcelana
- ⊕ Taras metálicas

Procedimiento.

- 1) Se pulverizó un cantidad de suelo secado al aire (de una muestra de 5 kg puesta a secar al aire 24 horas antes de ejecutar el ensayo), para obtener una muestra representativa del material que pasa el tamiz N° 40 alrededor de 250+/-10 gramos.
- 2) A continuación se verificó que la altura de caída de la casuela de casagrande sea exactamente 1 cm (+/- 0.1 mm).
- 3) Se colocaron 250 gr de suelo en el mortero de porcelana, se añade una pequeña cantidad de agua para mezclar el suelo hasta obtener un color uniforme.
- 4) Se colocó dentro de la casuela de casagrande una pequeña cantidad de suelo hasta la profundidad adecuada para el trabajo de la herramienta ranuradora. Luego se emparejó la superficie de la pasta de suelo cuidadosamente con una espátula, y mediante el uso de la herramienta ranuradora, se cortó la pasta de suelo en dos partes iguales. Después se procede al conteo de los golpes necesarios para cerrar la ranura.
- 5) Se tomó una muestra para contenido de humedad (aprox. 40 gr) de la zona de cierre de la ranura, la cual se colocó en una tara y fue llevado al horno.
- 6) Se repitió esta secuencia para ensayos adicionales con número de golpes entre 20 y 25 y entre 15 y 20, para un total de cuatro ensayos.
- 7) Finalmente las cuatro muestras húmedas obtenidas en los ensayos se pesaron, y luego se llevaron al horno a 110°C.

6.2.2 Limite plástico. Es el contenido de humedad por debajo del cual se puede considerar el suelo como material no plástico.

Para este ensayo se utilizaron los siguientes equipos:

- ⊕ Mortero de porcelana
- ⊕ Botella con agua
- ⊕ Placa de vidrio
- ⊕ Espátula
- ⊕ Taras metálica

Procedimiento.

- 1) Se dividió en varios pedazos la muestra 20 a 30 gr de suelo que se habían separado con anterioridad durante la preparación de la muestra para límite líquido.
- 2) Se enrolló el suelo con la mano extendida sobre una placa de vidrio, con presión suficiente para moldearlo en forma de hilo de diámetro uniforme (3mm) hasta observar grietas
- 3) Esta secuencia se repitió el número de veces que se requiera para producir suficientes rollitos que permitan llenar la tara
- 4) Se pesó la tara llena y se colocó en el horno a 110°C

6.3 HUMEDAD NATURAL

Para determinar la humedad natural en el laboratorio, se utilizaron los siguientes materiales y equipos:

- ✦ Taras metálicas

- ✦ Espátula

- ✦ Horno

- ✦ Pinzas

- ✦ Balanza

- ✦ Guantes

6.3.1 Procedimiento. Primeramente, se extendió el material con el fin de que todo posea la misma humedad. Seguidamente, se tomó una muestra de éste no inferior de 100 gr. Es necesario haber registrado el peso del recipiente en el cual se tomará la muestra.

Se pesaron la tara más la muestra húmeda y luego se procedió a colocarlas en el horno a 110°C, hasta que secó completamente.

Finalmente, se tomó el peso de la tara más la muestra seca.

6.4 PRÓCTOR MODIFICADO

Este ensayo se empleó para la determinación rápida del peso unitario máximo y de la humedad óptima de una muestra de suelo (figura 6).

Figura 6. Práctica del PRÓCTOR



Existen los métodos A, B, C y D⁴. En el presente estudio se aplica el método A descrito a continuación.

6.4.1 Equipos.

- ⊕ Molde de diámetro 4"
- ⊕ Martillo de 12" de altura

⁴ Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras. TOMO I. I.N.V. – E-143. Pág. 143-1

⊕ Base uniforme estable

⊕ Taras metálicas

⊕ Espátula

⊕ Horno

6.4.2 Procedimiento.

1.) Se mezcló completamente la muestra representativa escogida, con agua suficiente para humedecerla hasta obtener mínimo tres puntos de porcentaje por debajo del contenido de humedad óptimo. Se obtendrá una mayor precisión en la determinación del peso unitario máximo, a medida que la humedad se acerca al contenido de humedad óptima. El contenido de agua de la muestra nunca deberá exceder al óptimo.

2.) Se formó un espécimen compactando el suelo preparado en el molde en tres capas aproximadamente iguales, que proporcionó una profundidad total compactada de 6". Cada capa fue compactada mediante la aplicación de 56 golpes uniformemente distribuidos con el martillo.

Durante la compactación, el molde se mantuvo firmemente sobre una base uniforme densa, rígida y estable

3.) Después de la compactación, se removió el collar de extensión, se recortó cuidadosamente el suelo desigual compactado con respecto a la parte superior de este mediante una regla con filo, y se pesó el molde y el suelo húmedo en kg con una aproximación de 5 gramos.

- 4.) Tómese una muestra representativa del material para determinar el contenido de humedad real.

6.5 ENSAYO DE CONO DE ARENA

El método del cono de arena se utilizó para conocer en forma indirecta el volumen de un agujero (figura 7).

Figura 7. Práctica del Cono de Arena



Los equipos utilizados para realizar este ensayo son:

- ⊕ Cono de arena
- ⊕ Placa para apoyar el cono

- ⊕ Brocha
- ⊕ Cuchara
- ⊕ Destornillador
- ⊕ Molde de compactación

6.5.1 Procedimiento.

- 1) Se colocó la placa de apoyo del cono de arena en el sitio donde se realizará el ensayo, teniendo en cuenta que la superficie del terreno esté totalmente plana
- 2) Se excavó un hueco utilizando un destornillador para aflojar el suelo y luego removerlo con una cuchara
- 3) Se limpió el hueco cuidadosamente de boronas de suelo suelto
- 4) A continuación se colocó cuidadosamente boca-abajo el aparato del cono de arena sobre la placa y se abrió la válvula. Cuando la arena cesó de caer en el agujero, se cerró la válvula y se levantó el conjunto.
- 5) Finalmente se recuperó la arena del hueco.

6.6 ENSAYO DE LA RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR).

Tiene un equipo de CBR que consta de un molde de compactación de 15.2cm de diámetro X 17.8cm de altura (o equivalente, con collar). Disco espaciador de 15.1cm de diámetro X 6.14cm de altura (ó 5.1cm de altura si

ese está disponible). Martillo de compactación (bien el de 24.5N o el de 44.5N según lo designe el instructor). Aparato para medir la expansión con deformímetro de carátula de precisión de 0.01mm. Máquina de compresión equipada con pistón de penetración CBR (diámetro de 4.953cm con sección transversal de 19.4cm²) y capaz de penetrar a una tasa de 1.27mm/min.

Los ensayos de CBR se hacen usualmente sobre muestras compactadas al contenido de humedad óptimo para el suelo específico, utilizando el ensayo de compactación estándar o modificada. A continuación utilizando los métodos 2 ó 4 de las normas ASTM D698-70 ó D1557-70 (para molde de 15.2cm de diámetro), se debe compactar las muestras utilizando las siguientes energías de compactación:

MÉTODO	GOLPES	CAPAS	PESO DEL MARTILLO N
D698: 2(suelos de grano fino)	56	3	24.5
4 (suelos gruesos)	56	3	24.5
D1557: 2(suelos de grano fino)	56	5	44.5
4 (suelos gruesos)	56	5	44.5

6.6.1 Procedimiento

- 1) Se prepararon aproximadamente 4.5kg de suelo de grano fino menor que el tamiz N° 4 o 5.5kg de material con partículas de 19mm de diámetro máximo, al contenido de humedad óptimo del suelo determinado con el esfuerzo de compactación adecuado (ensayo de compactación).
- 2) Antes de compactar el suelo en un molde, se tomó una muestra representativa para determinar el contenido de humedad (por lo menos 100gr si el suelo es de grano fino).

- 3) Se pesó el molde sin su base ni el collar.
- 4) Se ajustó el molde a la base, insertar el disco espaciador (el disco redondo sólido de 15.1 x 5.1cm) en el molde y se cubrió con un disco de papel de filtro.
- 5) El suelo fue compactado de acuerdo a las Normas ASTM D698 ó D1557 Métodos B o D para el suelo utilizado. Se tomó una muestra representativa para determinar el contenido de humedad final del suelo remanente.
- 6) Posteriormente se quitó el collar y se enrasó la muestra suavemente hasta nivelarla en el molde. Se llenó con suelo fino los pequeños huecos que se hallan podido formar en la operación anterior de nivelación de la muestra. Para suelos de grano grueso se pueden utilizar partículas de suelos ligeramente menores que el agujero para completar el volumen en el sitio requerido.
- 7) Luego se retiró la base y el disco espaciador, se pesó el molde con el suelo compactado y se determinó el peso unitario total del suelo.
- 8) Se colocó un disco de papel filtro sobre la base, la muestra fue invertida (de forma que el espacio de 5.1cm dejado por el disco espaciador quede en la parte superior), y se aseguró el molde a la base de forma que el suelo quedara en contacto con el papel filtro.
- 9) Fueron colocadas suficientes pesas ranuradas (no menos de 4.5kg) sobre la muestra del suelo para simular la presión de sobrecarga requerida.
- 10) Se sumergió el molde y las pesas en una cámara húmeda.

- 11) Se colocó la muestra en la máquina de compresión y se sentó el pistón sobre la superficie de suelo utilizando una carga inicial no mayor de 4.5kg. Se fijó el cero en los deformímetros de medida de carga y de penetración (o deformación).
- 12) Fueron tomadas lecturas de carga contra deformación o penetración a cada 0.5mm de penetración hasta llegar a un valor de 5.0mm (figura 8). Y finalmente fue extruida la muestra del molde y se tomaron muestras representativas adicionales para contenido de humedad.

Figura 8. Práctica del CBR



6.7 PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO (CBR in situ)

El ensayo de **PDC** es un ensayo muy sencillo y fácil de ejecutar (figura 9), el procedimiento realizado fue el siguiente:

- ⊕ Se seleccionó el punto de ensayo con el fin de que no hayan perturbaciones en el mismo, este debe distanciarse por lo menos metro y medio de cualquier otro punto ya ensayado.
- ⊕ En el punto seleccionado se colocó el dispositivo de golpeo de tal manera que quedó centrado y vertical la guiadera y el soporte guía.
- ⊕ El varillaje y la guiadera deben quedaron perfectamente acoplados
- ⊕ Se verificó que el equipo se encontrara en buen estado y limpio
- ⊕ Se limpiar el sitio donde se realizó el ensayo para un buen funcionamiento del equipo.
- ⊕ Se colocó el equipo en el sitio donde se llevó acabo el ensayo
- ⊕ El equipo se colocó en forma recta para evitar el roce entre el martinete y la barra
- ⊕ Luego se colocó la regla en cero para tomar las lecturas de penetración
- ⊕ Se colocó el martinete a la altura prefijada y se dejó caer libremente
- ⊕ Se tomaron las respectivas medidas de penetración una vez dejado caer el martinete teniendo presente desechar la primera lectura ya que esta no es representativa de la profundidad de penetración, debido a que el golpe es menor a los golpes subsiguientes
- ⊕ Se tomaron lecturas hasta cuando estas fueron muy pequeñas o hasta donde se alcanzó la profundidad deseada

- ✦ Finalmente se retiró el equipo del sitio de ensayo y se revisó la punta de penetración para verificar que se encontrara en buen estado.
- ✦ En este caso, se simuló una súbase en el laboratorio, la cual tenía 15 cm de espesor y de acuerdo con la energía de compactación aplicada, cumplía con una densidad igual al 98% del próctor modificado.

Figura 9. Práctica del PDC



7. CÁLCULOS

Para realizar un análisis acerca de los resultados obtenidos en el laboratorio, se hace necesario realizar cálculos los cuales permiten aclarar los procesos percibidos.

Los datos analizados en el laboratorio son registrados en formatos que ilustran de una forma organizada los resultados obtenidos (ver anexos A, B, C y D).

7.1 DATOS Y CÁLCULOS DEL CBR OBTENIDO EN EL LABORATORIO.

En el laboratorio se realizaron unos ensayos preliminares, descritos anteriormente, con los cuales se determinó la metodología a aplicar. En este caso la clasificación de los materiales (ver anexo E, F, G y H), indicó que se debe aplicar el método I.

Los materiales analizados cumplen con los parámetros granulométricos estipulados por el INVIAS⁵.

Los ensayos preliminares fueron, Gradación, Límites de Atterberg, Humedad Natural y Próctor Modificado.

Los formatos definen la clasificación, la humedad óptima y su control, la densidad seca máxima, curva granulométrica, entre otros. Se realizaron 12 ensayos de CBR por cada material, con el fin de obtener datos promedios para disminuir el margen de error. (Ver anexo A y B)

⁵ Especificaciones Generales de Construcción de carreteras. Artículo 320-96. Pág. 320-1.

Los resultados obtenidos mediante la práctica en el laboratorio se describen a continuación:

Tabla 5. Resultados del CBR, Práctica en laboratorio

CBR EN LABORATORIO		
	MATERIAL MUNARRIZ	MATERIAL OCHOA
Nº	CBR	
1	80	36
2	48	42
3	46	51
4	58	61
5	69	53
6	52	31
7	78	36
8	49	38
9	28	39
10	68	38
11	60	59
12	45	63
CBR prom	56,75	45,58

7.2 DATOS Y CÁLCULOS DEL CBR MEDIANTE LA SIMULACIÓN DE COMPACTACIÓN EN CAMPO PARA LA UTILIZACIÓN DEL PDC.

La compactación in situ, se logró simulando una subbase de 15 cm de espesor, la cual se le aplicó la energía de compactación necesaria para obtener una densidad igual al 98% de la obtenida en el próctor modificado, la cual equivale a 2.4 g/cm³.

Los resultados obtenidos mediante la simulación son los siguientes:

Tabla 6. Resultados del CBR, Práctica in situ

PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO		
ECUACIÓN	CBR in situ	
	MATERIAL	
	MUNARRIZ	OCHOA
Sánchez	42,44	36,45
Javeriana	64,45	54,35
Javeriana	24,03	21

Estos valores resultaron de la aplicación de las ecuaciones que se han desarrollado en el país y dependen del número dinámico de penetración (ver anexos C y D).

7.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS E IDENTIFICACIÓN DE LA ECUACIÓN QUE MEJOR SE AJUSTE A LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS.

Después de realizar las 12 pruebas correspondientes se logra identificar la ecuación mejor ajustada a cada material en estudio, así mismo se proporcionan conocimientos que permiten que al utilizar el equipo PDC y aplicar la ecuación apropiada se cuente con un menor grado de incertidumbre.

Al comparar los resultados se obtiene:

Tabla 7. Comparación CBR in situ – CBR en laboratorio

PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO		
ECUACIÓN	CBR in situ	
SEGÚN	MATERIAL	
	MUNARRIZ	OCHOA
$CBR = 567(DN)^{-1.40}$	42,44	36,45
$CBR = 1169 (DN)^{-1.566}$	64,45	54,35
$CBR = 239 (DN)^{-1.24}$	24,03	21
CBR EN LABORATORIO		
MUNARRIZ	OCHOA	
56,75	45,58	

La realización de los ensayos correspondientes “CBR” en laboratorio y “CBR” in situ permitieron identificar mediante la tabla 7 la ecuación del Penetrometro Dinámico de Cono que se ajusta a las propiedades de los materiales de las canteras en estudio.

Los resultados obtenidos parten de los ensayos realizados tanto en el laboratorio como in situ, los primeros corresponden al ensayo CBR método I y los segundos se derivan de la aplicación de las ecuaciones colombianas utilizadas para determinar CBR con el PDC, es decir, in situ.

De acuerdo a lo anterior las ecuaciones que mejor se ajustan a los materiales analizados (MUNARRIZ y OCHOA) corresponden a:

 Material de la cantera Munárriz:

$$CBR = 567(DN)^{-1.40}$$

Desarrollada por el ing. Sabogal.

✚ Material de la cantera Ochoa:

$$\text{CBR} = 1169 (\text{DN})^{-1.566}$$

Desarrollada en la universidad Javeriana.

8. CONCLUSIONES

El desarrollo de esta investigación se proyectó en ejecutar los estudios correspondientes para lograr resultados que permitieran dar a conocer una información suministrada por métodos experimentales.

Con base a los resultados obtenidos es preciso inferir que los ensayos realizados sobre los materiales extraídos de las canteras Munárriz y Ochoa describen las propiedades características de los suelos en estudio y su comportamiento.

La ecuación que mejor se identifica para el cálculo del CBR mediante la aplicación del Penetrómetro Dinámico de Cono, respecto al material de la cantera Munárriz corresponde a la ecuación $CBR = 567(DN)^{-1.40}$ desarrollada por el ing. Sabogal, la cual se aproxima un 88.05% a los resultados obtenidos en el laboratorio.

Respecto al material de la cantera Ochoa, la ecuación que mejor se ajusta corresponde a $CBR = 1169 (DN)^{-1.566}$ desarrollada en la universidad Javeriana, ésta se aproxima un 83.86% respecto a los resultados del CBR obtenidos en el laboratorio.

Con la identificación de estas ecuaciones ajustadas a los respectivos materiales, se logra minimizar los trabajos realizados en campo, lo cual se manifiesta en la reducción de costos.

De esta misma forma, al momento de realizar el ensayo del CBR in situ con el Penetrómetro Dinámico de Cono, se logra disminuir el grado de incertidumbre, debido a que la ecuación escogida para la evaluación de la

resistencia de la subbase en el pavimento flexible, corresponde a las propiedades del material en cuestión, que en este caso serían Munárriz y Ochoa.

De igual manera sería importante realizar una futura investigación que desarrolle una ecuación que se ajuste en un 100% a los materiales de las canteras de la ciudad de Barranquilla.

BIBLIOGRAFÍA

- **INSTITUTO NACIONAL DE VIAS**, Especificaciones técnicas. Santafé de Bogotá, D. C.: INVIAS, Ministerio de Transporte, 1998.
- **MONTEJO FONSECA**, Alfonso. Ingeniería de Pavimentos para Carreteras. Santafé de Bogotá, D. C.: Universidad Católica de Colombia, 2002. pág. 134
- **GRAU**, Raúl. Penetrómetro Dinámico de Cono (P.D.C.), Barranquilla, 1998, pág. 6-20. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Corporación Universitaria de la Costa, C.U.C. Facultad de Ingenierías, Programa de Ingeniería Civil. Área de Pavimentos.
- _____. Exploración del Subsuelo mediante PDC. www.Ingenieríageológica.iespuma.es/ (vía Internet)
- _____. Capacidad de Soporte de la Subbase. www.Javeriana.edu.co (vía Internet)
- _____. Institución de la construcción. www.construcción.org.pe. (vía internet)
- **ROLONG**, Manuel. Manual de Laboratorio de Pavimentos, Barranquilla, 1998, pág. 87-99. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Corporación Universitaria de la Costa, C.U.C. Facultad de Ingenierías, Programa de Ingeniería Civil. Área de Pavimentos.

- **INSTITUTO NACIONAL DE VIAS**, Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras. Santafé de Bogotá, D.C. Ministerio de Transporte. TOMO I. I.N.V. – E-143. Pág. 143-1
- **BOWLES**, Joseph. Manual de Laboratorio de Suelos. Santafé de Bogotá, D.C. 1989.
- _____. Atlas Geológico. [www. Ingeomin.gov.co/web/mapas](http://www.Ingeomin.gov.co/web/mapas) (vía Internet)

